

Thomas Aigle, Philipp Krien, Lutz Marz

Die Evaluations-Matrix

Ein Tool zur Bewertung antriebs- und kraftstoff-
technologischer Innovationen in der Automobilindustrie

SP III 2007-105

ZITIERWEISE/CITATION:

Thomas Aigle, Philipp Krien, Lutz Marz

Die Evaluations-Matrix

Ein Tool zur Bewertung antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen
in der Automobilindustrie

Discussion Paper SP III 2007-105

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (2007)

Schwerpunkt:

Organisationen und
Wissen

Research Area:

Organizations and
Knowledge

Abteilung:

Innovation und
Organisation

Research Unit:

Innovation and
Organization

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH (WZB)

Reichpietschufer 50, D-10785 Berlin

Telefon: +49 30 25491-201, Fax: +49 30 25491-209

www.wzb.eu/ow/inno

Zusammenfassung

Das Automobil ist nicht nur mit Abstand der Verkehrsträger Nummer 1, sondern es ist ein integraler Bestandteil moderner Gesellschaften und ein Symbol für Status, Wohlstand, Freiheit, Dynamik und Fortschritt. Der harte technische Kern des Autos besteht in einer über hundert Jahre alten Verbrennungsmotorik, bei der fossile Brennstoffe aus der Natur importiert und Treibhausgase in die Natur exportiert werden. Dieser harte technische Kern erweist sich zunehmend als problematisch, und zwar sowohl im Hinblick auf die Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen als auch in Bezug auf die Emissionen und deren Folgen. Im letzten Jahrzehnt wurde deshalb weltweit eine Vielzahl von Innovationen in Angriff genommen, um die fossile Verbrennungsmotorik zu optimieren und zu substituieren. In der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, dieses breit gefächerte Feld antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen aus einer interdisziplinären Perspektive zu systematisieren und zu evaluieren. Im Zentrum steht dabei die Entwicklung einer Evaluations-Matrix. Mit dieser Matrix werden zwei Ziele verfolgt. Erstens sollen die Innovationen mit Hilfe technischer, ökonomischer und ökologischer Parameter quantifiziert werden. Aufbauend darauf werden diese Innovationen dann zweitens im Hinblick auf die Erreichung gesetzlicher Zielvorgaben miteinander verglichen und bewertet.

Abstract

Not only is the automobile the world's number one transportation vehicle, it is also a vital part of modern societies. It is a status symbol representing prosperity, freedom, and progress. The main technical component of the automobile is the more than a century old internal combustion engine which, in order to function, requires fossil fuels. Despite this dependency on nature, the toxic gases it produces are responsible for an important part of the pollution to our environment. Thus the internal combustion engine is increasingly becoming a problem due to the limitation of the fossil fuels it requires, on the one hand, and to the toxic emissions and subsequent environmental pollution it produces on the other. For the past decade, a multitude of technical innovations has been presented and implemented worldwide in order to optimize or even provide a substitute for the internal combustion engine. It is the purpose of this paper to attempt to analyse this wide variety of innovations in the fields of alternative fuels and new engine types from an interdisciplinary perspective. This analysis is centred around the development of an evaluation matrix. This matrix has two aims, the first of which is to quantify these innovations by using technical, economical and ecological parameters. Based on these parameters, the innovations are then compared and evaluated with regard to meeting the statutory objectives.

Inhalt

1. Konvention und Hyperselektion in der Automobilindustrie	7
2. Dreifacher Innovationsdruck und gesetzliche Regelungen	11
2.1. Dreifacher Innovationsdruck	12
2.2. Gesetzliche Regelungen	16
3. Ableitung und Aufbau der Innovations-Matrix	28
3.1. Ableitung	28
3.2. Aufbau	31
4. Ableitung und Aufbau der Evaluations-Matrix	33
4.1. Ableitung	33
4.2. Aufbau	36
4.2.1. Struktur	36
4.2.2. Daten	46
4.2.3. Evaluationsbereiche	48
5. Ziel/Ist-Vergleiche Schadstoffemissionen	66
5.1. Kohlendioxid	66
5.2 Stickoxide	71
5.3. Partikel	76
5.4. Ökologischer Gesamtvergleich	80
6. Fazit: Bilanz und Agenda	85
7. Bibliographie	90
7.1. Quellen zur Evaluations-Matrix	90
7.2. Literatur	93

1. Konvention und Hyperselektion in der Automobilindustrie

Das Automobil ist mit Abstand der Verkehrsträger Nummer 1: Ungefähr 90 Prozent aller Personenkilometer, die mit einem Verkehrsmittel zurückgelegt werden, entfallen auf das Auto (PGM 2004, 9). Doch damit nicht genug. Das Auto ist weit mehr als ein bloßes Fortbewegungsmittel. Es ist paradigmatisches Produkt und integraler Bestandteil der fossilen Mobilitätsgesellschaft (Altvater 2006, 175). Das Automobil gilt als Symbol für Status, Wohlstand, (Bewegungs-)Freiheit, Dynamik und Fortschritt der Moderne (Buhr et al. 1999, 11).

Und genau in dieser Doppeleigenschaft als Paradigma und Symbol wird das Auto auch in den aufstrebenden Wachstumsgesellschaften wahrgenommen, wie etwa in China, wo es sowohl als individuelles Statussymbol als auch als Beweis für die Modernität der Gesellschaft gefeiert wird (SHISD 2005, Knie 2006, 71-97).

Alle Versuche, die Dominanz des Automobils zu brechen, sind bislang mehr oder weniger gescheitert. Dies betrifft nicht nur die akademisch-aufklärerischen Kritiken an der Auto-gesellschaft und ihren Folgen, sondern auch alltagspraktische Alternativangebote wie »Car Sharing«, »Cash Car« oder »BVGmetrocard«, die sich bisher nicht durchsetzen, sondern bestenfalls in Nischenmärkten etablieren konnten (Canzler/Knie 1998, 9; Knie 2003; PGM 2004).

Konvention

Einer der Gründe für diese Ultrastabilität des Automobils besteht in dessen hartem technischen Kern. Wir schreiben nunmehr bereits das „Das zweite Jahrhundert des Automobils“ (Canzler/Schmidt 2003), aber sein technischer Kern ist bislang unverändert geblieben. Er besteht in einer Verbrennungsmotorik (Canzler 1996, 212-220), die zunächst fossile Brennstoffe, vor allem Öl, aus der Natur importiert und dann Schadstoffe und Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O) in die Natur exportiert.

Der erste 4-Takt-Verbrennungsmotor wurde 1876 vom Kaufmann Nikolaus Otto entwickelt (Rödl 2006). Gottlieb Daimler und Carl Benz bauten dann 1886 das erste Kraftfahrzeug mit einem benzinbetriebenen Ottomotor (Rödl 2006). Mit der Erfindung der Einspritzpumpe gelang es in den 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts auch den selbstzündenden Dieselmotor in Pkws einzusetzen. Seither führt der auf Rohölprodukten basierende Verbrennungsmotor eine Alleinherrschaft. Er stellt bis heute die Konvention in der automobilen Antriebstechnik schlechthin dar. Im Jahre 2000 befanden sich rund 800 Mio. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren weltweit im Einsatz, bis 2030 werden sogar 1,6 Mrd. Fahrzeuge prognostiziert (Schubert 2003, 2).

Die F&E-Arbeit der Automobilindustrie ist nach wie vor auf die Optimierung dieser Konvention fokussiert. In der folgenden Abbildung sind die beiden wesentlichen Entwicklungsziele skizziert, die dabei verfolgt werden.

Entwicklungsziele bei der der Optimierung der Konvention

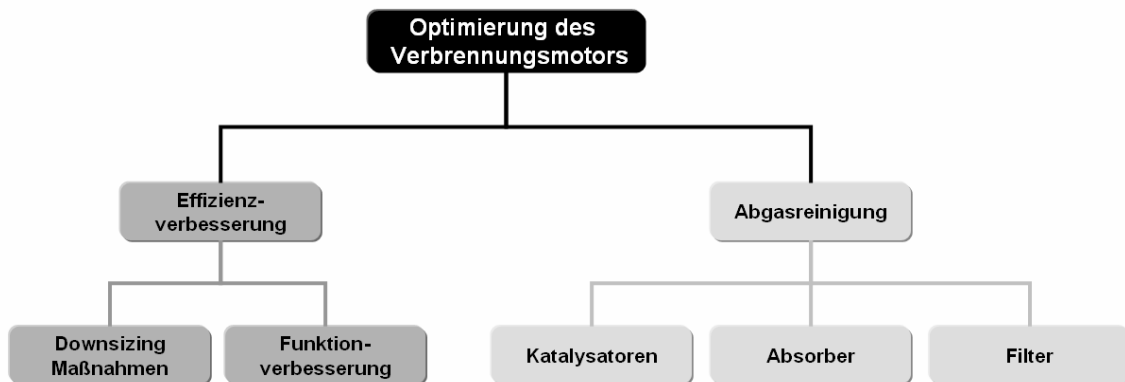


Abbildung 1, Quelle: eigene Darstellung

Die Verbrennung soll zum einen immer effizienter und zum anderen auch immer sauberer werden. Etwas plakativ formuliert lautet damit das Credo der Motorentwickler derzeit »DiesOtto«, also die Entwicklung eines Motors, der so effizient wie der Diesel und so sauber wie der Otto-Motor arbeitet. Die folgende Abbildung stellt einen detaillierten Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten zur Optimierung eines Hubkolbenmotors dar.

Verbesserung konventioneller Funktionen (links) und der Prozessführung (rechts) am Kolbenmotor

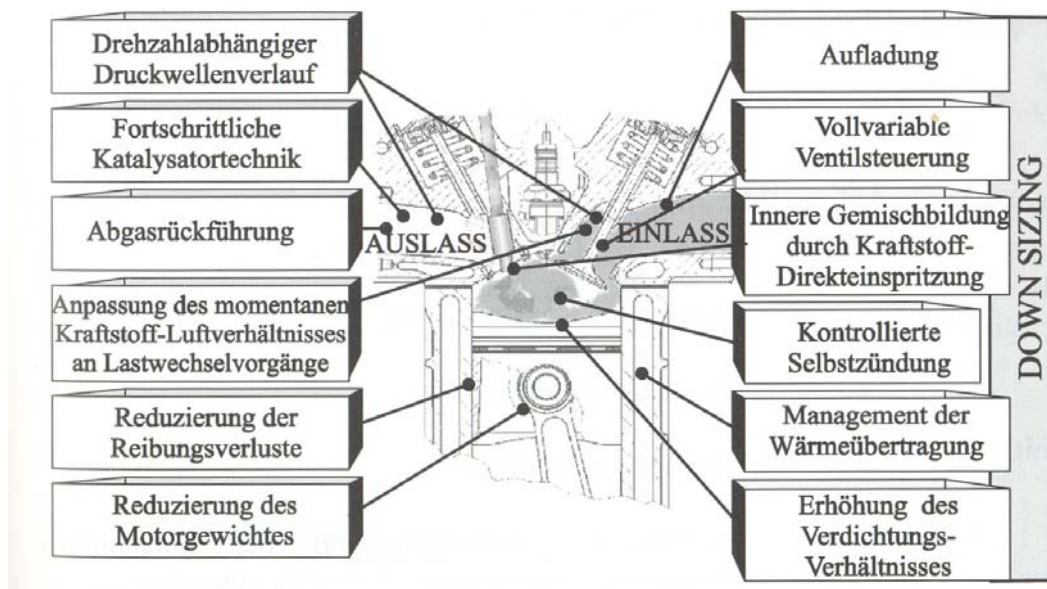


Abbildung 2, Quelle: Stan 2005, 47

In dieser Darstellung wird zwischen Maßnahmen zur Verbesserung konventioneller Funktionen (links) und Downsizing-Maßnahmen für eine verbesserte Prozessführung (rechts) unterschieden. Direkteinspritzung, elektronische Motorsteuerung, Vierventiltechnik, variable Ven-

tilsteuerzeiten oder mechanische Aufladung sind übliche Downsizing-Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung des Verbrennungs-Motors, vor allem des Benziners.

Zur Verbesserung der Luftqualität, insbesondere in Ballungsräumen ist eine effektive Abgasreinigung notwendig. Die drei wesentlichen Komponenten der Abgasreinigung sind der Katalysator, der Partikelfilter und der Absorber. Der 3-Wege-Katalysator kommt beim Ottomotor mit einem stöchiometrischen Kraftstoffgemisch ($\lambda=1$) zum Einsatz. Er kann Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) zu CO_2 plus Wasser oxidieren und gleichzeitig Stickoxide (NO_x) zu Stickstoff (N_2) reduzieren. Bei Dieselfahrzeugen sowie bei direkteinspritzenden Benzinern kann der 3-Wege-Katalysator aufgrund der mageren Gemischbildung, das heißt dem hohen Sauerstoffanteil im Abgas, nicht verwendet werden. Dort kommen Diesel-Oxidationskatalysatoren (DOC) zum Einsatz. Diese können allerdings nur die Kohlenwasserstoff-Anteile an den Russpartikeln mit Hilfe des Luftsauerstoffs im Dieselaabgas reduzieren. Zur Reduktion der NO_x -Emissionen auf das Niveau von Ottomotoren sind bei Dieselfahrzeugen NO_x -Speicherkatalysatoren oder SCR-Katalysatoren (Selective Catalytic Reaction) notwendig. Partikelfilter kommen vor allem als Russfilter in Dieselfahrzeugen zum Einsatz.

Das zukünftige Optimierungspotenzial des Benzinmotors wird auf 8 bis 15% (Pehnt 2001, 10; Bosch 2005) geschätzt. So beachtlich dies ist, kann dieses Potenzial jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass all diese Maßnahmen letztlich nicht auf die Substitution, sondern die Stabilisierung der fossilen Verbrennungsmotorik ausgerichtet sind. Die Optimierung der Konvention dominiert die Innovationsprozesse in der Automobilindustrie. Sie war und ist Hauptausgangspunkt und -ziel dieser Prozesse.

Hypersélection

Eine solche Fixierung der Innovationsprozesse auf die Optimierung und Stabilisierung eines »herrschenden Standes der Technik« (Knie 1991; Knie 1994, 29-70) ist nicht nur in der Automobilindustrie, sondern auch in anderen Branchen zu beobachten (Foray/Grübler 1990). Von daher kann es nicht erstaunen, dass dieses Phänomen auch zum Gegenstand grundlegender innovationstheoretischer Überlegungen und Analysen wurde.

Eine grundlagentheoretisch und interdisziplinär besonders verdienstvolle Rolle spielen hierbei jene Modellbildungen, die von naturwissenschaftlich-mathematischen Theorien der nichtlinearen Dynamik, der Evolution und der Selbstorganisation inspiriert sind (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998, 362-263). In diesen Modellen werden die Dominanz einer Technologie sowie die Struktur des dadurch aufgespannten Innovationsraumes auf ebenso präzise wie anschauliche Begriffe gebracht (Bruckner et al. 1993; Ebeling/Scharnhorst 2002).

In vielen dieser Modelle werden dabei technische Innovationsprozesse als Substitutionsprozesse verstanden, in denen eine bestehende Technologie durch eine oder mehrere neue Technologien ersetzt wird. Dieser Ansatz wurde bereits ab Beginn der 1960er Jahre mathematisch modelliert (Mansfield 1961; Fisher/Pry 1971) und in der Folgezeit systematisch weiterentwickelt und generalisiert (Tingyan 1990). Klassischerweise wird dabei der Substitutionsprozess in Form eines S-kurvenartigen Wachstums modelliert, bei dem der Anteil der neuen Technologie am gemeinsamen Markt steigt.

Obgleich diese klassischen S-Kurven-Modelle bereits wesentliche Einblicke in die Struktur und den Verlauf von Innovationsprozessen gewähren (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998, 373-376), besitzen sie im Hinblick auf die Beschreibung und Analyse der Optimierung eines herrschenden Standes der Technik und der daraus erwachsenden Spezifik des Innovationsraumes zwei gravierende Nachteile: Zum einen gehen sie von einem linearen Substitutionsprozess aus. Zum anderen gestatten sie es nicht, die aus der Optimierung der Konvention entstehenden Substitutionsblockaden in den Blick zu bekommen.

Diese beiden Schwächen des klassischen Ansatzes werden in neueren, nichtlinearen und hyperselektiven Substitutionsmodellen überwunden (Ebeling/Scharnhorst 2002, 68-72). Dabei lassen sich zwei Gruppen von Modellen unterscheiden, und zwar deterministische und stochastische Modelle. Beide Modelle ermöglichen es, die Optimierung eines herrschenden Standes der Technik und die daraus erwachsenden Innovationsblockaden begrifflich exakt zu beschreiben und zu analysieren.

Der zentrale Begriff ist dabei die „Hyperselektion“ (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998, 377-380). „Das Charakteristische des Hyperselektionsfalls liegt gerade darin, dass der einmal stabilisierte Zustand stabil gegenüber allen Störungen ist...“ (Ebeling/Scharnhorst 2002, 69). Oder, anders gesagt: Die Optimierung einer dominanten technischen Konvention verstärkt deren Hyperselektivität. Und dies wiederum führt dazu, dass alle anderen vorhandenen und potenziellen Technologien vom herrschenden Stand der Technik ausselektiert werden, bevor sie Fuß fassen und sich entwickeln können.

Dieser Prozess wird in den deterministischen und stochastischen Modellen aus verschiedenen Blickwinkeln und mit unterschiedlicher Akzentsetzung beschrieben. Sehr schlagwortartig und vereinfacht gesagt sind die deterministischen Modelle im Hinblick auf die Hyperselektion sehr situativ, die stochastischen Modelle hingegen mehr perspektivisch zentriert.

In den deterministischen Modellen wird die aktuelle Wirkungs(über)macht einer hyperselektiven Technologie beschrieben und erklärt. Alternative Technologien haben hier eine verschwindend geringe, im Grunde gar keine Chance, sich gegen die Omnipotenz des herrschenden Standes der Technik zu behaupten oder gar durchzusetzen. Deterministische Modelle beschreiben tendenziell eine „once for ever“-Selektion (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998, 378), das heißt, eine dominante Konvention ist und bleibt dominant, womit die Entwicklung abbricht und weitere Substitutions- bzw. Innovationsprozesse ein für alle mal unmöglich gemacht werden.

In den stochastischen Modellen wird diese sehr regide Konsequenz der deterministischen Modellbildung relativiert. Die Hyperselektion einer herrschenden Technik ist auch hier mächtig, aber nicht übermächtig. Alternative Technologien, die in deterministischen Modellen keinerlei Durchsetzungschancen haben, besitzen in stochastischen Modellen zwar geringe aber immerhin nennenswerte Realisierungsmöglichkeiten. Ihre Entwicklung ist nicht von vornherein aussichtslos (Ebeling/Scharnhorst 2002, 70). Stochastische Modelle zeigen auf, dass und wie Substitutions- und Innovationsprozesse trotz Hyperselektion unter bestimmten Bedingungen erfolgreich sein können.

Eine zentrale Rolle spielen dabei die „Nischen“ (Bruckner/Ebeling/Scharnhorst 1998, 376-380; Ebeling/Scharnhorst 2002, 70-72). Sie bieten alternativen Technologien eine Art Schutz- und Entwicklungsraum, der sie vor der (Über-Macht) einer sich ständig optimierenden herrschenden technischen Konvention bewahrt, weil deren Dominanz dort neutralisiert

wird. Die mathematischen Analysen zeigen ferner, dass neben der Existenz von Nischen „vor allem auch der Zeitpunkt und die Art und Weise der Einführung einer neuen Technologie entscheidend für ihre Durchsetzung am Markt ist“ (Ebeling/Scharnhorst 2002, 73). Dies machen gegenwärtig die Hyperselektion der fossilen Verbrennungsmotorik und der auf ihr lastende Innovationsdruck sehr anschaulich deutlich.

2. Dreifacher Innovationsdruck und gesetzliche Regelungen

Die Hyperselektion der konventionellen Verbrennungsmotorik wird zunehmend problematisch und gerät in wachsendem Maße unter Innovationsdruck. Stichpunktartig vereinfacht lässt sich dieser Druck folgendermaßen veranschaulichen:

Druck auf die Substitution der konventionellen Verbrennungsmotorik

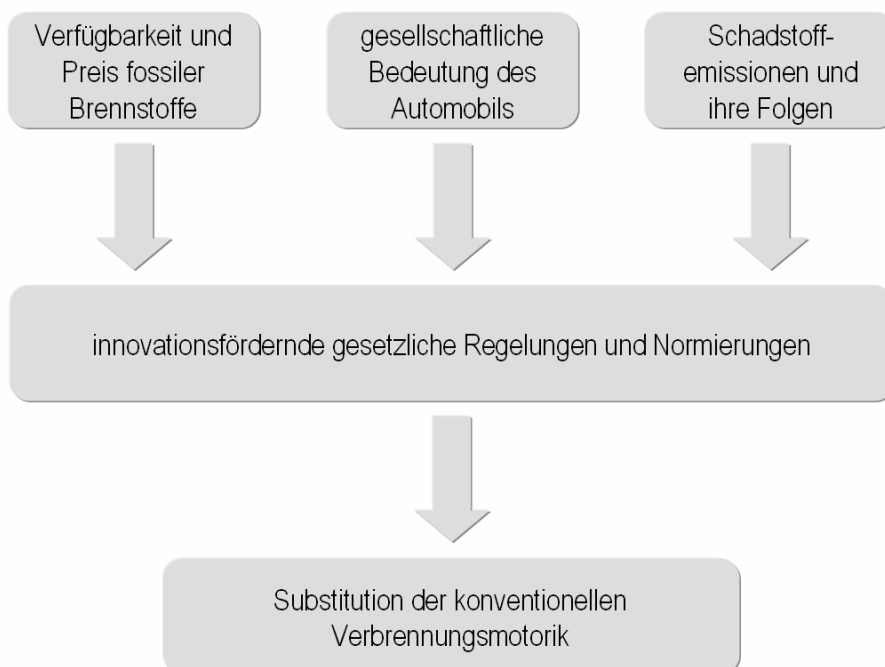


Abbildung 3, Quelle: eigene Darstellung

Der Innovationsdruck unter den die konventionelle Verbrennungsmotorik gerät, erwächst zunächst aus drei Problemfeldern, und zwar der Verfügbarkeit und dem Preis fossiler Brennstoffe, der gesellschaftlichen Bedeutung des Automobils sowie der Schadstoffemissionen und deren Folgen. Die Entwicklungen in diesen drei Problemfeldern führten zu innovationsfördernden gesetzlichen Regelungen und Normierungen, die eine antriebs- und kraftstofftechnologische Substitution der konventionellen Verbrennungsmotorik fördern und erzwingen.

Dieser Prozess wird im Folgenden in zwei Schritten beschrieben: In einem ersten Schritt wird zunächst der aus den drei Problemfeldern resultierende Innovationsdruck näher analysiert. In einem zweiten Schritt werden dann wesentliche gesetzliche Regelungen und Normierungen beschrieben, die auf eine Substitution der konventionellen Verbrennungsmotorik zielen.

2.1. Dreifacher Innovationsdruck

Verfügbarkeit und Preis fossiler Brennstoffe

Der Verkehr hängt gegenwärtig zu etwa 90% vom Öl ab (Schindler/Weindorf 2003, 8). Die konventionelle Verbrennungsmotorik ist nahezu 100-prozentig ölabhängig. Die Verfügbarkeit und der Preis des Öls haben deshalb einen entscheidenden Einfluss auf die Substitution beziehungsweise Nicht-Substitution dieser Technik. Vereinfacht gesagt gilt: Große Verfügbarkeit plus kleine Preise gleich schwacher Substitutionsdruck. Geringe Verfügbarkeit plus hohe Preise gleich starker Substitutionsdruck.

Was zunächst die Verfügbarkeit des Öls betrifft, lassen sich drei Analytiker-Gruppen ausmachen, nämlich die Wachstums-Analytiker, die Plateau-Analytiker und die Gipfel-Analytiker.

- Die Wachstums-Analytiker gehen davon aus, dass sich die Ölförderung in den nächsten Jahrzehnten durch die Erschließung so genannter „nicht-konventioneller“ Ölquellen weiter steigern lässt. Beispielsweise durch die Gewinnung von Öl aus Sanden und Schiefer. Zu dieser Gruppe gehören die Internationale Energie Agentur (IEA) in Frankreich und die Energy Information Administration (EIA) in den USA. (Birol 2002; Wood/Long/Morehouse 2004).
- Die Plateau-Analytiker halten eine Steigerung der Förderquoten zwar prinzipiell für möglich, allerdings lang- und nicht mittelfristig. Sie gehen davon aus, dass die Ölförderung zunächst stagniert und die Erschließung neuer Erdölvorkommen und die Entwicklung moderner Fördertechnologien erst in einem Jahrzehnt eine spürbare Erhöhung ermöglicht. Zu dieser Gruppe gehören Analysten der Investment Bank Goldman Sachs in den USA. (Goldman Sachs 2005)
- Die Gipfel-Analytiker schließlich sind der Auffassung, dass der Peak der Öl-Förderung bereits erreicht ist bzw. bis etwa 2010 erreicht wird und die Förderquote endgültig nicht weiter erhöht werden kann, sondern tendenziell abnimmt. Zu dieser Gruppe gehören die L-B-Systemtechnik GmbH (LBST) in Deutschland und die Association for the Study of Peak Oil&Gas (ASPO) in Irland. (Zittel/Schindler 2003; ASPO 2006)

Während die Einschätzungen im Hinblick auf die Öl-Förderung extrem divergieren, konvergieren sie in Bezug auf die zu erwartende Nachfrage. Hier gibt es, soweit wir sehen, keine Prognosen, die davon ausgehen, dass der Öl-Bedarf in den nächsten Jahren konstant bleiben oder gar sinken würde. Unisono gehen die Experten von einer Erhöhung der Nachfrage aus (Birol 2002; Zittel/Schindler 2004). Dies kann auch nicht überraschen. Allein China treibt mit seinem Hyperwachstum (Knie 2006, 15-54) die weltweite Nachfrage zunehmend in die Höhe (Trinh 2005, 24).

Setzt man nun den steigenden Öl-Bedarf mit den zuvor diskutierten gegensätzlichen Förderprognosen in Beziehung, dann ergibt sich folgendes Bild:

Prognosen der Öl-Förderung und des Öl-Bedarfs

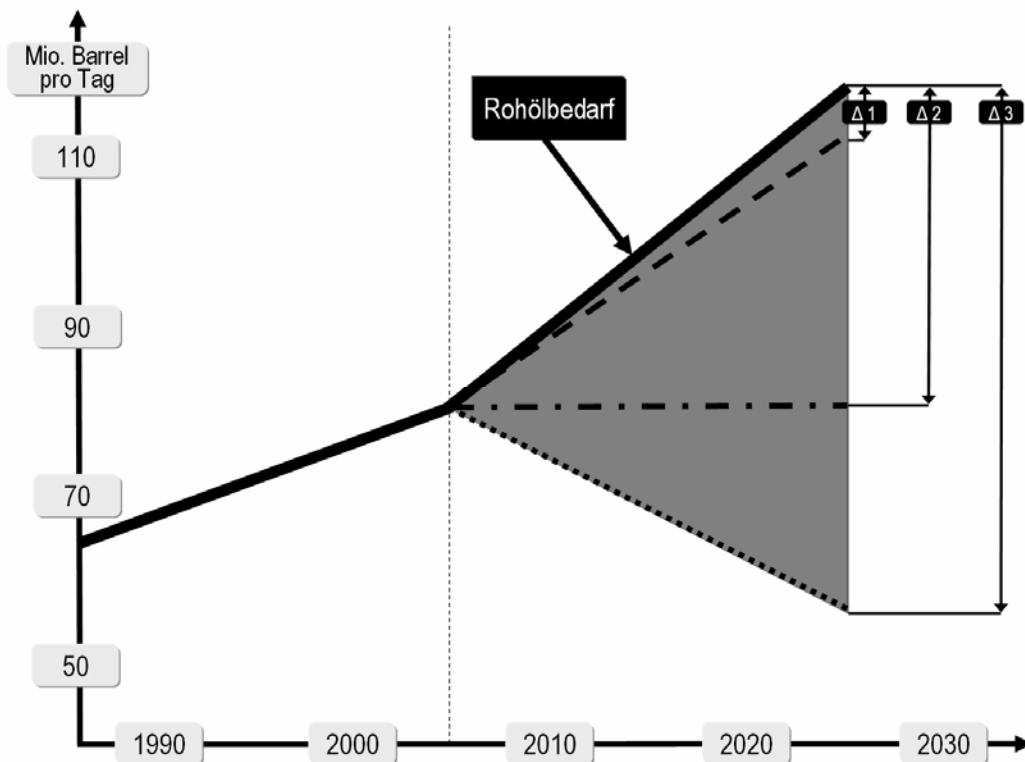


Abbildung 4, Quelle: eigene Darstellung

Dabei ist das Δ die Differenz zwischen dem voraussichtlichen Öl-Bedarf und den jeweiligen Förderprognosen der Wachstums-Analytiker ($\Delta 1$), der Plateau-Analytiker ($\Delta 2$) und der Gipfel-Analytiker ($\Delta 3$). Und es ist unschwer zu sehen, dass gilt:

$$\Delta 1 < \Delta 2 < \Delta 3$$

Diese unterschiedlichen Differenzen zwischen Nachfrage (Öl-Bedarf) und Angebot (Öl-Förderung) haben unterschiedliche Auswirkungen auf den Öl-Preis. Während $\Delta 1$ lediglich zu einem geringfügigen Anstieg der Preise führen würde, wäre die Preiserhöhung bei $\Delta 2$ schon gravierend. Und träte der Fall $\Delta 3$ ein, käme es zu einer Explosion der Öl-Preise. Angesichts der Prognosen der Plateau- und der Gipfel-Analytiker werden dann für die nächsten Jahre auch schon Preise von bis zu 250 Dollar pro Barrel prophezeit (Liebermann 2005). Aber selbst im Falle $\Delta 1$ besitzen Preise von 50 oder gar 30 Dollar pro Barrel, wie sie in neuesten McKinsey-Szenarien unterstellt werden (McKinsey 2006, 22), keinerlei Plausibilität.

Gesellschaftliche Bedeutung des Automobils

Das Automobil ist tief in den Kernstrukturen moderner Gesellschaften verankert und filigran mit den Alltagswelten der Menschen verwoben. Nahezu alle Bürger haben bis zu ihrem 30. Geburtstag einen Führerschein (Buhr et al. 1999, 11; PGM 2004, 9). Das Automobil ist eine Art „Universalgerät“ (ebenda), es ist nicht nur Verkehrsträger, sondern auch „Reizschutzpan-

zer“ (Rammler 2001, 56), der die Nutzer vor den ökologischen, sozialen und psychosomatischen Zumutungen der Verkehrsströme abschottet. Es ist ein polyvalentes Transportmittel, das Wohn-, Einkaufs-, Arbeits- und Freizeiträume miteinander verbindet (Canzler 1997, 101). Es ist Cockpit und Konzertsaal, telematisches Wunder und Lebenstraum, Rennwagen und Flaniermobil, Objekt der Begierde und des Ärgers, Gebrauchsgegenstand und Prestigeemblem.

Aber das Automobil hat sich nicht nur tief in den Habitus des modernen Menschen eingeschrieben, sondern auch in die Ökonomie moderner Gesellschaften. Die Automobilindustrie ist eine der tragenden Säulen der deutschen Wirtschaft, und zwar sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht. Im Jahre 2005 betrug der Anteil der Automobilindustrie am Gesamtumsatz der Industrie 19% (VDA 2006, 182). Im gleichen Jahr arbeiteten 13,2% aller in der Gesamtindustrie Beschäftigten in der Automobilindustrie (ebenda, 183). Im Jahre 2002 entfielen circa 33% aller Innovationsaufwendungen des Verarbeitenden Gewerbes auf die Automobilindustrie (Jürgens/Meißner 2005, 24). Und im Jahre 2004 resultierten ungefähr 10% der gesamten Steuereinnahmen aus der Besteuerung von Fahrzeugen und Kraftstoffen (McKinsey 2006, 118).

Sieht man sich einmal allein den Indikator »Beschäftigung« etwas näher an, verschärft sich das Bild nochmals: Bei insgesamt steigender Arbeitslosigkeit und einer sinkenden Zahl von Arbeitsplätzen, hat die Automobilindustrie in den letzten zehn Jahren in Deutschland 130.000 Arbeitsplätze geschaffen (VDA 2006, 183), soviel, wie keine andere Branche. Schätzungen zufolge waren 2005 direkt in der Automobilindustrie mehr als 766.000, in den vor- und nachgelagerten Bereichen ca. 1,4 Mio. und indirekt insgesamt 5,3 Mio. Menschen beschäftigt (ebenda; Roventa/Weber 2006; BDI 2006, 7).

Doch damit erschöpft sich nicht die ökonomische Bedeutung des Automobils. Hinzu kommt die Infrastruktur, die das Auto erfordert. In Deutschland gab es 2005 insgesamt 15.187 Tankstellen, davon 14.811 Straßen- und 376 Autobahn-Tankstellen (MWV 2006a, 37). Im gleichen Jahr betrug die Kapazität der Entschwefelungsanlagen für Benzine 28,9 Mio. Tonnen (ebenda, 38). Im Jahre 2004 existierten Mineralöl-Tanklager mit einem Fassungsvermögen von über 71,5 Mio. m³ (ebenda, 36). Ende der 90er Jahre hatte das Pipeline-Netz für Rohöl eine Gesamtlänge von 2.370 km und ein Aufkommen von 89,3 Mio. Tonnen (MWV 2000, 23, 24). Hinzu kommt das große NATO-Netz (CEPS/NEPS), das in Deutschland eine Länge von 2.800 km besitzt (ebenda, 17).

Zur Mineralöl-Logistik der Automobilitäts-Maschine gehören jedoch nicht nur Tankstellen, Entschwefelungsanlagen, Tanklager und Pipelines, sondern auch Seetanker, Binnenschiffe, Eisenbahn-Ganzzüge und -Einzelwagen sowie Straßen-Tankwagen und Anhänger. 1998 gab es 38.500 Eisenbahn-Kesselwagen mit einer Ladekapazität von 2,6 Mio. m³ sowie 10.548 Straßen-Tankwagen und 8.794 Tankanhänger mit einer Ladekapazität von insgesamt 270.184 Tonnen (MWV 1999, 33). Hinzu kommen das Straßen- und Autobahnnetz, die Vertriebs- und Service-Netze, die Versicherungs- und Rechtsschutz-Dienstleistungen etc.

Allein diese wenigen Daten und Fakten machen deutlich, dass das Auto zu einem Hauptstützpfiler moderner Gesellschaften geworden ist – auch und gerade in Deutschland. Er ist ebenso in den Herzen und Hirnen der Menschen wie in der institutionellen Architektur und Ökonomik der gesamten Gesellschaft verankert.

Schadstoffemissionen und ihre Folgen

Seit geraumer Zeit sind zwei Trends zu beobachten und unter Experten auch weitgehend unstrittig: Zum einen, dass seit 1861, dem Beginn systematischer meteorologischer Aufzeichnungen, sowohl die global gemittelte Temperatur als auch die Temperatur der nördlichen Hemisphäre ansteigen (UBA 2001; IPCC 2001, 49). Zum anderen, dass seit Beginn der Industrialisierung, also seit Ende des 18. Jahrhunderts, die Konzentration von Treibhausgasen, insbesondere von CO₂, CH₄ und N₂O, in der Atmosphäre zunimmt, und zwar exponentiell (UBA 2001; IPCC 2001, 47).

Strittig war jedoch bis vor Kurzem, ob beide Trends etwas miteinander zu tun haben, insbesondere, ob und inwieweit die steigende Treibhausgas-Konzentration die Temperaturerhöhung verursacht. Hier gab es unter den Experten zwei gegensätzliche Auffassungen (HBS 2006): Die einen vertraten die Ansicht, dass die beobachtete Erwärmung weitgehend natürliche Ursachen habe und vor allem durch die Schwankungen der Solarstrahlung bedingt sei. Die anderen waren der Überzeugung, dass nicht natürliche, sondern anthropogene Faktoren, vor allem eben die Treibhausgas-Emissionen für den Temperaturanstieg verantwortlich zeichnen.

Lange waren die Experten der letztgenannten Gruppe in der Minderzahl und es war unklar, welches der beiden Lager recht behalten sollte. Selbst in renommierten naturwissenschaftlichen Journalen wurde noch Mitte der 90er Jahre die Meinung vertreten, dass die exponentiell wachsende CO₂-Konzentration „bisher nicht mit einer signifikanten Änderung der Atmosphärentemperatur verknüpft“ sei (Trömel/Loose 1995, 165). Inzwischen ist der anthropogene Charakter der Erderwärmung unter Experten weitgehend unbestritten (IPCC 2001, 50-51; UBA 2001; BMBF 2003, 8).

Beides, die Konzentration der drei Treibhausgase und die dadurch verursachte Erhöhung der Temperatur zeichnen sich seit Beginn des 20. Jahrhunderts durch ein exponentielles Wachstum aus. Und dieses Wachstum blieb nicht folgenlos. Experten beobachten eine Vielzahl von Phänomenen, die durch die Temperatur-Erhöhung verursacht wurden (UBA 2001). Es steht heute zweifelsfrei fest, dass die durch die Treibhausgas-Emission verursachte Temperatur-Erhöhung weltweit zu erheblichen Klimaveränderungen führen wird. (UBA 2001; IPCC 2001, 82; BMBF 2003, 48)

Und es ist auch weitgehend unstrittig, dass es zwingend notwendig ist, die Treibhausgas-Emissionen, insbesondere die CO₂-Emissionen zu senken. Dies betrifft alle Verursacher, auch den Straßenverkehr. Experten sprechen davon, dass der Verkehrssektor „weltweit die am schnellsten wachsende anthropogene Quelle von Treibhausgasen (ist)“ (Rauh 2001, 4). Im Jahre 2000 hatte der Transportsektor in Deutschland einen Anteil von 21,9% an den gesamten CO₂-Emissionen, wovon wiederum 90% vom Straßenverkehr verursacht wurden (IFEU 2004, 4). Während es insgesamt von 1990 bis 2002 in Deutschland gelang, die CO₂-Emissionen um 18,6% zu reduzieren, erhöhten sich die Emissionen im Straßenverkehr um 10,5% (Schindler/Weindorf 2005, 5).

Damit steht die konventionelle Verbrennungsmotorik unter einem doppelten Druck: Zum einen hat sie einen überdurchschnittlich hohen Anteil an den gesamten CO₂-Emissionen (ebenda), zum anderen leistet sie einen unterdurchschnittlichen Beitrag zur Emissions-Reduzierung. Wenn bis Mitte dieses Jahrhunderts eine CO₂-Minderung in der Größenord-

nung von 80% erreicht werden soll (Enquete-Kommission 2002), dann muss der CO₂-Ausstoß des Verkehrssektors bis 2050 um 34 bis 55% gegenüber 2002 reduziert werden (SRU 2005, 2).

Neben Kohlendioxid entstehen bei Verbrennungsprozessen auch die »klassischen« Luftschadstoffe. Zu diesen zählen Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC), Stickoxide (NO_x) und Rußpartikel (PM). Sie haben unmittelbaren Einfluss auf die menschliche Gesundheit und werden durch den Gesetzgeber reglementiert.

Die Entwicklung aller drei Problemfelder, der Verfügbarkeit und Preise fossiler Brennstoffe, der gesellschaftlichen Bedeutung des Automobils sowie der Schadstoffemissionen und deren Folgen, führte dazu, dass sich der Innovationsdruck erhöht hat. Dies wird besonders anschaulich deutlich, wenn man sich die Geschichte und den Inhalt jener gesetzlichen Regelungen und Normierungen vor Augen führt, in denen dieser Innovationsdruck so juristisch verarbeitet und verdichtet wird, dass sie eine Substitution der konventionellen Verbrennungsmotorik befördern und erzwingen.

2. 2. Gesetzliche Regelungen

Verbrennungsprozesse verursachen zwangsläufig Emissionen. Abhängig von Konzentration und Menge sind diese schädlich und können zum frühzeitig Tod führen. Untersuchungen der EU zur Folge sterben jedes Jahr 400.000 Europäerinnen und Europäer vorzeitig an den Folgen der Luftverschmutzung. Erkrankungen, die auf die derzeitige Belastung mit Feinstaub zurückzuführen sind, machen jährlich mehr als 100.000 zusätzliche Krankenhauseinweisungen erforderlich. (Europäische Kommission 2005, 4). Durch die anthropogene Feinstaubbelastung sinkt die durchschnittliche Lebenserwartung um neun Monate und erhöht sich die Zahl von Atemwegserkrankungen wie Bronchitis und Asthma. (ebenda).

Die thermische Verbrennung ist damit janusköpfig. Einerseits war und ist sie die Basis technischen Fortschritts und gesellschaftlicher Entwicklung, andererseits unterminieren die Emissionen und ihre Folgewirkungen diesen Fortschritt. Um diese Janusköpfigkeit zu bewältigen, entwickelten die Menschen seit tausenden von Jahren gesetzliche Regelungen, um die negativen Folgen der Verbrennungsprozesse zu minimieren oder gänzlich zu beseitigen, ohne auf deren positive Effekte zu verzichten.

Im Folgenden wird die Herausbildung gesetzlicher Regelungen in drei Schritten skizziert. In einem ersten Schritt wird zunächst ein kurzer schlaglichtartiger geschichtlicher Abriss dieser Regelungen gegeben. Im zweiten Schritt werden wesentliche gesetzliche Regelungen in Deutschland und Europa vorgestellt. Drittens schließlich wird die Gesetzgebung in Kalifornien und den USA beschrieben.

Geschichtlicher Abriss

Der Beginn menschlicher Kultur ist entscheidend durch die Nutzung des Feuers zur Nahrungszubereitung, Wohnraumerwärmung und zum Schutz vor Wildtieren gekennzeichnet. In den Höhlen, Zelten, Hütten und Häusern kam es erstmals zu Luftverunreinigungen durch Verbrennungsgase und Ruß mit schädlichen Wirkungen für die Menschen. So ergaben Untersuchungen einer Mumie, dass bereits vor 3.800 Jahren der Rauch von Lagerfeuern zu Lungenschädigungen geführt hat (Wolbach 2006). Schon damals musste zwischen dem

Nutzen der Verbrennungsprozesse und dem Schaden der Emissionen ein Ausgleich gefunden werden.

Durch die Erhöhung der Siedlungsdichte und gewerbliche Zentralisierung wurden zunehmend staatliche Regulierungsmaßnahmen notwendig, da sich Anwohner an den Gerüchen und Reizungen der Augen und Atemwege, sowie an Auswirkungen auf die Natur als ihrer Nahrungsgrundlage störten. Mit zunehmender Anzahl verschiedener Verursacher wurde die Zuordnung nach dem Verursacherprinzip immer schon kontrovers diskutiert.

Ein frühes Beispiel gewerblicher Emissionen ist der Rauch aus den Glasöfen in Rom um 150 nach Christus. Hier ist die räumliche Nähe von Produktions- und Wohnraum als Problem erkannt und mittels eines Gesetzes beseitigt worden. Die Glasmacher wurden gezwungen, ihre Werkstätten in die Vororte der Stadt zu verlegen (DZBI 2006).

Im 13. Jahrhundert gab es in England viele Beschwerden und Probleme durch die Verbrennung stark schwefelhaltiger Kohle. 1272 verbot König Edward I. deren Gebrauch bei Androhung der Todesstrafe und aus dem Siedlungsraum London wurden die Schwefelemitenten auch von seinen Nachfolgern wiederholt verbannt (Wolbach 2006).

In Deutschland wurden Schmelzhütten sowohl in Köln 1464 als auch in Augsburg 1623 aufgrund von Nachbarschaftsbeschwerden über ungesunden Rauch und Dampf per Ratsbeschluss abgerissen (DZBI 2006). Die Produktion wurde nicht aufgegeben, sondern an einen anderen Standort verlegt.

Im 19. Jahrhundert war das schwerwiegendste Umweltproblem die als »Rauch- und Rußplage« bezeichnete Verschmutzung der Luft. Die durch Kohlefeuerung der Haushalte und die Industrie verursachten Belästigungen wurden auch als Symbol des Fortschritts gesehen, wobei in Ballungszentren die gesundheitlichen und vegetativen Einbußen so eklatant waren, dass die Geschädigten Verbände gründeten und eine Zeitschrift mit dem Namen „Staub und Ruß“ herausgaben (Brüggemeier, Toyka-Seid 1995; 60-62).

Der Dissens über die Gesamtbilanz einer Wachstumstechnologie führte über Kurz oder Lang zu legislativen Maßnahmen. In dem Maße, wie sich Widerstand gegen die Verbreitung abgasintensiver Technologien formierte, entstand aber nicht nur ein Druck auf die gesetzgebenden Einrichtungen, mit entsprechenden Regelungen einzugreifen, sondern auch auf die Verursacher, durch technische Maßnahmen und die Reduktion der Schadstoffemission organisatorischer Regulierung zuvorzukommen.

Ein sehr anschauliches Beispiel dafür ist die internationale Ausstellung von Apparaten und Einrichtungen zur Vermeidung des Rauches, die 1881 in London organisiert wurde und damals viel Beachtung fand. Hier wurden verschiedene Methoden zur Vermeidung von Rauch vorgestellt, angefangen von der Verwendung bestimmter Brennstoffe bis hin zum Einsatz glühender Körper. (Bach 1882)

Eine frühe technische Entwicklung zur Reduzierung von Automobil-Emissionen findet in den Münchener Neueste Nachrichten vom 7. März 1910 Erwähnung. Um die von den Autos verursachte Staubentwicklung einzudämmen, werden zunächst organisatorische Maßnahmen wie Geschwindigkeitsbegrenzungen auf 10 km/h und Pflasterzölle diskutiert. Zugleich wird den Autofahrern, die diesen Maßnahmen langfristig entgehen wollen, empfohlen, eine Anlage zu benutzen, die die Autoreifen in belebten Straßen mit Wasser benetzt (Brüggemeier, Toyka-Seid 1995, 87-89).

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts wurden die neuartigen Automobile neben der stark an Bedeutung gewinnenden Industrie von der Politik als Emittentengruppe so genannter »Stinkgase« identifiziert. So konstatierte der Abgeordnete von Kloeden 1911 im preußischen Abgeordnetenhaus: „Automobile tragen auch dazu bei, dieses Höllegebräu zu vergrößern, dass ... im Frühjahr geeignet ist, die Rebblüte und auch selbst die Obstblüte erheblich zu schädigen ... vor 1.000 Jahren hatten wir reine Flüsse, reine Luft und reinen Boden, und heute hat der Kulturmensch verschmutzte Flüsse, verseuchte Böden und verstämkerte Luft.“ (Kloeden 1911, 103)

Allgemein sichtbare Zeichen für die Folgen von Schadstoff-Emissionen alarmierten Experten und Öffentlichkeit immer in besonderem Maße. So wurde zum Beispiel in den 1980er Jahren das »Waldsterben« stark diskutiert. Im Ergebnis einer von 1983 bis 1985 durchgeführten »Waldschadensinventur« wurde festgestellt, dass bereits über die Hälfte der bayerischen Bäume geschädigt war – Tendenz steigend (BMELF, BMLU 1985).

Durch umweltchemische Untersuchungen wurden Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxide (NO_x) als Verursacher einer Verminderung des pH-Wertes im Regenwasser identifiziert. Diese Gase bilden zusammen mit Wasser schweflige Säure (H_2SO_3) und Salpetersäure (HNO_3). An der Schadstoffgruppe der Stickoxide, waren zu mehr als 55% die Kraftfahrzeugabgase beteiligt (Keber 1997). Dies führte dazu, dass verstärkt über wirksame gesetzliche Reglementierungen dieser Abgase diskutiert wurde.

Gesetzliche Regelungen in Deutschland und Europa

Vor diesem Hintergrund kann es nicht erstaunen, dass auch und gerade im boomenden Nachkriegsdeutschland, mit Wirtschaftswunder-Wachstumsraten und Massenautomobilisierung sehr bald gesetzliche Regelungen zur Schadstoffreduzierung auf die Tagesordnung kamen.

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) gilt in Deutschland seit 1974. Dieses immer wieder ergänzte und aktualisierte Gesetz befasst sich im vierten Teil mit dem Pkw als Emissionsquelle. Es schreibt einerseits die bundesweit einheitliche Prüfung und Genehmigung potenziell gefährlicher Anlagen vor Inbetriebnahme vor und gewährt andererseits einen weitgehenden Bestandsschutz und eine große Rechtssicherheit nach der Genehmigung. Umgesetzt werden die Ansprüche des Gesetzes in den Bundes-Immissionsschutzverordnungen (BImSchV).

Die 35. BImSchV-Kennzeichnungsverordnung nach §40 ermöglicht es den Lokalbehörden, gestaffelte Fahrverbote auszusprechen. Pkw mit geringem Schadstoffausstoß können, durch Plaketten gekennzeichnet, von diesen Fahrverboten ausgenommen werden. Verkehrs- und Umweltminister sind nach §§ 38 und 39 ermächtigt, Verordnungen zu erlassen und so auch EU-Richtlinien umzusetzen (BMU 2006), wie etwa die Richtlinie 96/62/EG über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität (Luftqualitätsrahmenrichtlinie). Ziel dieser Richtlinien ist die Festlegung von Immissionsgrenzwerten.

Die Immissionen setzen sich aus unterschiedlichen Emissionsquellen zusammen, die in Luftreinhalteplänen regional limitiert werden. Mobile Emittenten, wie Pkw, können allerdings nicht regional limitiert werden.

Die folgenden beiden Tabellen zeigen die Abgasemissionsgrenzwerte für Personenkraftwagen in Europa gemäß EG-Richtlinie 70/220/EWG in den Fassungen 91/441/EWG, 94/12/EG und 98/69/EG. Da bei den europäischen Zulassungsbedingungen Diesel- und Benzinfahrzeuge getrennt behandelt werden, gibt es auch jeweils unterschiedliche Euro-Normen.

Euro-Norm für Pkw mit Benzinmotor

Benzinmotor Pkw	Euro 1^(a)	Euro 2^(a)	Euro 3^(a)	Euro 4^(a)	Euro 5^(b)	Euro 6^(b)
Implementierung	Juni 1992	Jan. 1996	Jan. 2000	Jan. 2005	Sept. 2009	Sept. 2014
CO [mg/km]	3160	2200	2300	1000	1000	1000
HC [mg/km]	X	X	200	100	100	100
HC + NOx [mg/km]	1130	500	X	X	X	X
NOx [mg/km]	X	X	150	80	60	60
NMHC* [mg/km]	X	X	X	X	68	68

X: kein Grenzwert, *NMHC: non-Methan-Hydrocarbons

Abbildung 5, Quelle: eigene Darstellung, ^(a)UBA 2006a, ^(b)EP 2006

Euro-Norm für Pkw mit Dieselmotor

Dieselmotor Pkw	Euro 1^(a)	Euro 2^(a)	Euro 3^(a)	Euro 4^(a)	Euro 5^(b)	Euro 6^(b)
Implementierung	Juni 1992	Jan. 1996	Jan. 2000	Jan. 2005	Sept. 2009	Sept. 2014
CO [mg/km]	2720	100	640	500	500	500
HC + Nox [mg/km]	X	700/ 900*	560	300	230	170
NOx [mg/km]	X	X	500	250	180	80
PM [mg/km]	140	80/ 100*	50	25	5	5

X: kein Grenzwert, *Höhere Werte für Direkteinspritzer zur Markteinführung

Abbildung 6, Quelle: eigene Darstellung, ^(a)UBA 2006a; ^(b)EP 2006

Die Grenzwerte der Euro-5-Norm entsprechen dem Vorschlag der EU-Kommission. Der deutsche Bundesminister Gabriel fordert aktuell eine Anpassung der NOx-Emissionsgrenzwerte von Dieselaautos an das Niveau der Benzinfahrzeuge (BMU 2005).

Da die Abgasnorm in Deutschland einen direkten Einfluss auf die Höhe der Kraftfahrzeugsteuer hat, ist ein ökonomischer Anreiz gegeben, Altfahrzeuge technisch nachzurüsten. Etwas 10 Mio. Pkw sind in Deutschland gegenwärtig mit Euro 1 Abgasnorm oder schlechter zugelassen (KBA 2007, 16-17). Durch Einbau schadstoffreduzierender Technik können diese aufgewertet und in eine bessere und billigere Schadstoffklasse eingestuft werden (BMF 2005a).

Die Kfz-Steuer wird jährlich je Pkw und 100 Kubikzentimeter Hubraum von Hubkolbenmotoren erhoben. Diese Proportionalität zur Motorgröße begünstigt vor allem die kleineren Pkw-Segmente mit Ottomotoren.

Bei Dieselfahrzeugen großer Laufleistung werden der jährliche Mehraufwand bei der Kfz-Steuer (ebenda) und der höhere Anschaffungspreis durch die geringeren Kraftstoffkosten amortisiert. Dies hängt mit den geringeren Verbrauchswerten vergleichbarer Dieselmotoren und der seit 1989 stufenweise erhöhten Differenz der Energiesteuer, ehemals Mineralölsteuer, auf die beiden konventionellen Kraftstoffe zusammen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Entwicklung der Kraftstoffbesteuerung von 1951 bis 2003.

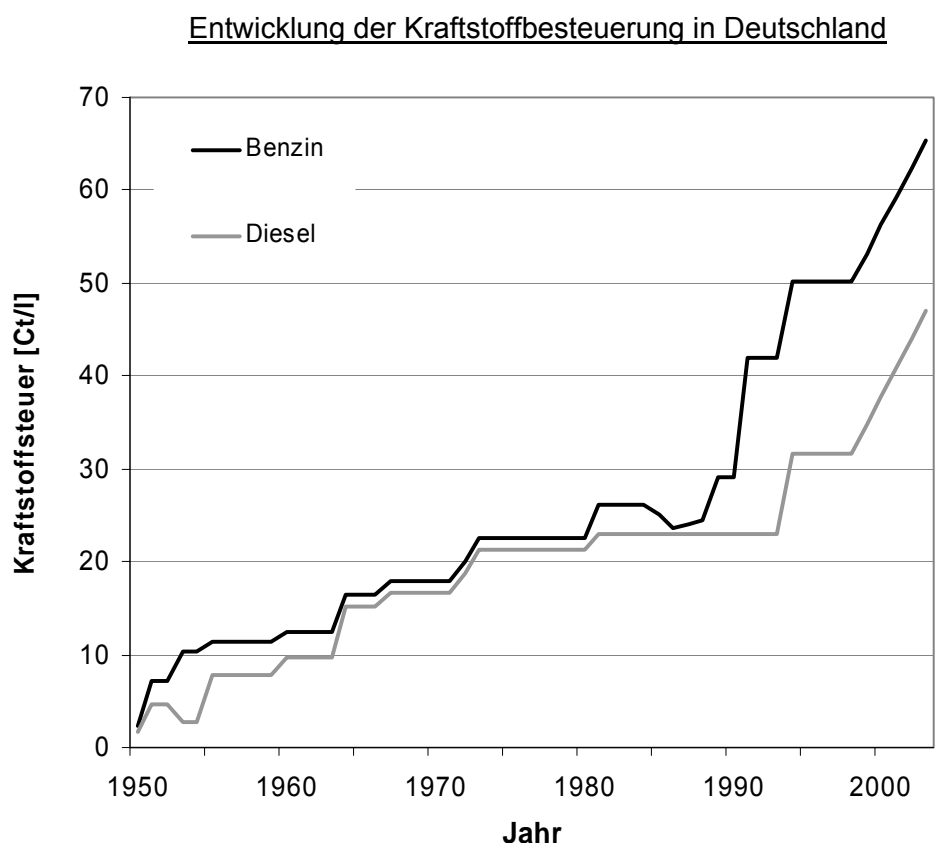


Abbildung 7, Quelle: BMF 2005b

Die Steuersenkungen Mitte der 80er Jahre waren eine erfolgreiche Maßnahme um den bleifreien gegenüber dem herkömmlichen Ottokraftstoff zu fördern. Heute wird in Deutschland ausschließlich bleifrei getankt. Für schwefelarme Kraftstoffe gibt es seit 2001 einen ähnlichen Ansatz, allerdings in weitaus geringerem Umfang (BMF 2005b). Wie bei dem bleifreien Kraftstoff besteht auch beim schwefelfreien eine Verbindung zur Einführung neuer Katalysatortechnik.

Gesetzliche Regulierungen der Automobilemissionen spielen in Deutschland eine doppelte Rolle. Zum einen bedingt die zentrale Lage des Landes ein großes Verkehrsaufkommen. Eine hohe Verkehrsdichte sowie die hohen Geschwindigkeiten auf Autobahnen führen zu einem verhältnismäßig großen Emissionspotenzial. Zum anderen basiert die Volkswirtschaft, wie bereits oben gezeigt, ganz erheblich auf der Automobilindustrie und deren inter-

nationalen Marktchancen. Diese sollen unter anderem durch die Harmonisierung mit den amerikanischen Grenzwerten erhalten bleiben. So ließ Bundesumweltminister Gabriel verlautbaren: „Die Abgasstandards in der EU dürfen nicht geringer sein als diejenigen in den Vereinigten Staaten. Außerdem müssen mögliche Diskriminierungen von Dieselfahrzeugen wegen eines schlechteren Emissionsverhaltens von vornherein vermieden werden“ (BMU 2005). Die für 2008 zu erwartenden Änderungen sollen sich, wie bereits die aktuellen Grenzwerte, an kalifornischen Benchmarks orientieren, um die europäische Exportwirtschaft nicht zu belasten.

In der folgenden Abbildung 8 wird deutlich, wie sich die Euro 4-Norm für benzinbetriebene Fremdzünder an den aktuellen kalifornischen ULEV Standard anlehnt. Ein Zusammenhang zwischen US-amerikanischen Vorgaben und europäischen Regelungen besteht bereits seit den 1970er Jahren als die Katalysatortechnologie in den USA durch Emissionsgesetzgebung erzwungen wurde (Weider 2006).

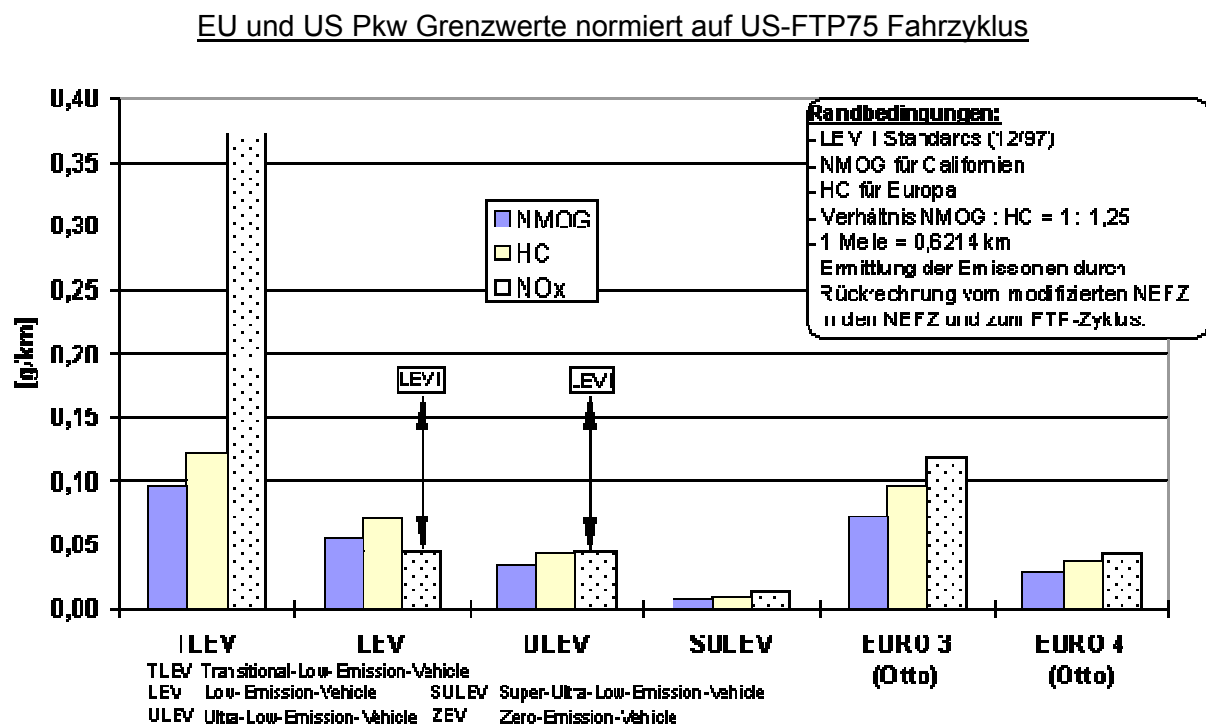


Abbildung 8, Quelle: UBA 2006a

Die kalifornische LEV-Gesetzgebung sieht eine Fahrzeugtypisierung nach Schadstoffen vor, es wird dabei unterschieden zwischen den Fahrzeug-Kategorien TLEV, LEV, ULEV und SULEV. LEV steht dabei jeweils für „Low-Emission-Vehicle“, also Niederemissions-Fahrzeug. Der bzw. die vorangestellten Buchstaben geben Auskunft über die Höhe der zulässigen Emissionen, damit ein Fahrzeug in die jeweilige Kategorie fällt. Das „U“ bei der ULEV-Kategorie steht beispielsweise für „Ultra“, „SU“ für „Super-Ultra“. Zur Abgrenzung von den Low-Emission-Vehicles werden Null-Emissions-Fahrzeuge als Zero-Emission-Vehicle, kurz ZEV bezeichnet. In den weiteren Ausführungen werden wir näher auf die für Europäer etwas ungewohnte kalifornische Schadstofftypisierung eingehen und auch die zugehörigen Emissions-Grenzwerte der Kategorien vorstellen.

Gesetzliche Regelungen in Kalifornien und den USA

In den USA wurde der Staat Kalifornien aufgrund seiner geografischen Bedingungen und seiner Siedlungsstruktur zuerst und besonders massiv mit den Problemen der Luftverschmutzung konfrontiert. Allein in Kalifornien leben über 34 Mio. Menschen und 23,4 Mio. Fahrzeuge waren im Jahr 2000 zugelassen (CARB 2006a). Kalifornien gilt daher als Vorreiter auf dem Gebiet der Emissionsgesetzgebung für Straßenfahrzeuge.

Im Folgenden wird zuerst in Abbildung 9 ein kurzer chronologischer Abriss der Entwicklung der föderalen (AMETSOC 2006) und kalifornischen (CARB 2006a) Emissionsgesetzgebung bis 1990 gegeben, anschließend werden die Daten und Fakten der nach 1990 folgenden kalifornischen Gesetzgebungen genauer vorgestellt. Zuletzt wird schließlich noch kurz das Zusammenspiel zwischen der kalifornischen und der US-amerikanischen Bundesgesetzgebung skizziert.

Chronologie der Emissionsgesetzgebung in den USA und Kalifornien

Jahr	Maßnahme
1947	Unter dem Eindruck der massiven Smogprobleme wurde der »California Air Pollution Control Act« erlassen. Er bildete die Grundlage für die Einrichtung des »Los Angeles (LA) Air Pollution Control District (APCD)«, um die Luftverschmutzung im Ballungsraum LA zu überwachen und bekämpfen.
1955	Der »Federal Air Pollution Control Act« tritt in Kraft, um Ursachen und Folgen der Luftverschmutzung in den USA zu untersuchen.
1959	Das kalifornische »Department of Public Health« soll Luftqualitätsstandards und Steuermaßnahmen für den Schadstoffausstoß von Motorfahrzeugen einführen.
1960	Der kalifornische »Motor Vehicle Pollution Control Board« (MVPCB) testet und zertifiziert bereits Abgasreinigungstechnik; der »Federal Motor Vehicle Act« legt die Untersuchung der Schadstoffbelastung durch Kfz in den USA fest.
1963	Der föderale »Clean Air Act« (CAA) schafft die Grundlage für bundesweite Kriterien zur Beurteilung der Luftqualität und Überwachungsstellen.
1965	Der »Federal Motor Pollution Control Act« schreibt Grenzwerte für Kfz-Emissionen vor, welche 1968 noch von über 50% der Neufahrzeuge verfehlt werden.
1966	Der MVPCB in Kalifornien führt verbindliche Grenzwerte für Autoabgase ein, deren Einhaltung von Polizeistreifen kontrolliert wird.
1967	Der »Federal Air Quality Act« bildet »Air Quality Control Regions« mit ähnlichen meteorologischen und geografischen Bedingungen. Im gleichen Jahr wird das »California Air Resources Board (CARB)« gebildet, das bis heute weitgehende technische und administrative Kompetenzen besitzt.
1970	Die »U.S. Environmental Protection Agency« (EPA) wird als nationale Umweltbehörde eingerichtet und der CAA novelliert.
1975	In Kalifornien werden durch den CARB die ersten 2-Wege-Katalysatoren eingeführt.
1980	Kalifornien überprüft, ob die Fahrzeuge auch langfristig die Grenzwerte einhalten. Damit erhöht sich für die Hersteller das Risiko späterer Rückrufaktionen.
1988	Der »Californian Clear Air Act« wird erlassen. Er regelt Maßnahmen zur Luftreinhaltung. Der CARB fordert für 1994 »On Board Diagnosis« (OBD), um Fehlfunktionen im Abgassystem zu erkennen.
1990	Ein Zusatz zum CAA fördert den Einsatz schwefelarmer und alternativer Kraftstoffe. Die Grenzwerte werden an die so genannte »Best Available Control Technology« gebunden. Im gleichen Jahr definiert der CARB einen kalifornischen Standard für »Low and Zero Emission Vehicles« (LEV I)

Abbildung 9, Quelle: eigene Darstellung, AMETSOC 2006, CARB 2006a

Der CARB hat im ZEV Amendment für die Jahre 1994 bis 1998 eine Reihe von Standards für »Low-Emission Vehicle« mit Grenzwerten festgelegt, die im Folgenden dargestellt sind. Die Richtwerte sollten für bestimmte Quoten jedes Herstellers gelten. Die Fahrzeuge eines Standards müssen über eine Lebensdauer von zehn Jahren oder eine Laufleistung von 50.000 Meilen bzw. 80.500 km eingehalten werden, die unteren Werte gelten für 100.000 Meilen bzw. 161.000 km.

Kalifornische Abgasgrenzwerte nach LEV I [mg/km*]

Kalifornischer Standard		CO		HC	NO _x
		bei 23,9 °C	bei -6,7 °C		
Transient Low Emission Vehicle (TLEV) 1994	0 – 80.500 km	2113	6214	78	249
	80.500-161.000 km	2610	X	97	373
Low-Emission Vehicle (LEV) 1997	0 – 80.500 km	2113	6214	47	124
	80.500-161.000 km	2610	X	56	186
Ultra Low-Emission Vehicle (ULEV) 1997	0 – 80.500 km	1056	6214	25	124
	80.500-161.000 km	1305		34	186
Zero-Emission Vehicle (ZEV) 1998	0 – 80.500 km	0	0	0	0
	80.500-161.000 km	0	0	0	0

* Werte umgerechnet von Meilen auf Kilometer

Abbildung 10, Quelle: eigene Darstellung; Wurster 1997

Durch die Einführung von Emissionsstandards im Neuwagengeschäft sollen die großen Autofirmen bewegt werden, einen progressiv steigenden Mindestanteil an emissionsarmen Fahrzeugen auf den Markt zu bringen. Der Begriff emissionsfreies Fahrzeug oder ZEV bezeichnet in der Praxis Autos, bei deren Betrieb die Antriebsaggregate keine schädlichen Abgase an die Umwelt abgeben und die somit Null-Emissions-Grenzwerte einhalten. 1998 sollten bereits 2%, 2001 5% und 2003 10% ZEV verkauft werden (Wurster 1997) – hochgesteckte Ziele, die von der Automobilindustrie nicht erreicht wurden.

Ursprünglich waren die Hoffnungsträger für das ZEV batterieelektrische Antriebe. Deren Reichweite erreichte jedoch nicht die Werte, die für ein marktfähiges Produkt gefordert wurden. So wurden die Termine, Quoten und auch die Standards in Verhandlungen zwischen dem CARB und der Automobilindustrie geändert, wenn beispielsweise nachgewiesen werden konnte, dass sie unerreichbar sind (Weider 2006). Trotzdem entsteht Innovationsdruck, da die Ergebnisse solcher Verhandlungen auch von den F&E-Ergebnissen konkurrierender Unternehmen beeinflussbar sind.

Eine weitere Möglichkeit, ein Fahrzeug ohne Schadstoffemissionen zu betreiben, ist mit der Brennstoffzellen-Technologie ins Rennen gegangen (Weider/Metzner/Rammler 2004). Kooperative Projekte wie der Hydrogen Highway, die California Fuel Cell Partnership und die Messe Hydrogen Expo US 2006 führten dazu, dass bereits 15 Wasserstofftankstellen in

Kalifornien für den Kraftstoffnachschub mehrerer kleiner Flotten von Brennstoffzellenfahrzeugen sorgen (Freesen 2005).

Der LEV II gilt heute in Kalifornien als Zulassungskriterium neuer Pkw (CARB 2006b) und ist bereits in anderen Bundesstaaten übernommen worden. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten LEV II-Grenzwerte zusammengefasst:

Kalifornische Abgasgrenzwerte nach LEV II [mg/km*]

Emissionsklasse		CO	NMOG ¹	NO _x	PM	HCHO ²
LEV – Low Emission Vehicle	0 – 80.5000 km	2112	47	43	6	9
	80.500-193.200 km	2609	56	62	6	11
ULEV – Ultra Low E. V.	0 – 80.5000 km	1056	25	31	6	5
	80.500-193.200 km	1304	34	43	6	7
SULEV – Super Ultra Low E. V.		621	6	12	6	3
EZEV – Equivalent Zero E. V.		106	2	12	0	0
PZEV1 – Partial Zero E. V.		106	2	3	0	0
ZEV – Zero Emission Vehicle		0	0	0	0	0

* Werte umgerechnet von Meilen auf Kilometer, ⁽¹⁾ NMOG: Non Methan Organic Gas, ⁽²⁾ HCHO: Formaldehyd

Abbildung 11, Quelle: eigene Darstellung, CARB 2004, CARB 2005, 46

Neuer limitierter Schadstoff ist das Formaldehyd (HCHO) oder Methanal in der letzten Spalte. Es reizt die Schleimhäute und kann Krebs im Nasenrachenraum auslösen, wenn es eingeatmet wird (BfR 2006). Weiter wurden die Grenzwerte für die NO_x- und Partikel-Emissionen verschärft sowie die Werte für die Laufleistung auf 120.000 Meilen (193.200 km) erhöht. Außerdem wurde die neue Kategorie SULEV aufgenommen und für die Zero-Emission-Vehicles die beiden Subkategorien EZEV und PZEV1 eingeführt.

Das aktuelle LEV II fordert seit 2003 für Zero Emission Vehicles einen Verkaufsanteil von 10% an Straßenfahrzeugen. Batteriefahrzeuge mit Reichweiten von über 160,9 km (100 Meilen) erhalten zunächst einen Bonus, der dann schrittweise reduziert werden soll. Der Hybridantrieb mit seinem Elektromotor oder Erdgasfahrzeuge mit Hochdrucktanksystemen werden als ATULEV bewertet. Die vorangestellte Bezeichnung „AT“ vor einem ULEV-Fahrzeug steht für „Advanced Technology“, bei diesem Fahrzeug sind Synergieeffekte zu den angestrebten Zero-Emission-Vehicles zu erwarten. So können die 10% ZEV auch mittels festgelegter Anrechnungsfaktoren bis zu 60% von SULEV-Fahrzeugen ersetzt werden. Hybridfahrzeuge sollen beispielsweise bei großer Reichweite im Elektrobetrieb bis 2007 wie ZEV bewertet werden (UBA 2006b). Auch Erdgasfahrzeuge mit optimierter Motorentechnik, können zur Quote beitragen (Assenmacher 2003). Diese Quoten können gehandelt werden (CARB 2005) und sind auch durch eine größere Anzahl an Fahrzeugen aus der ATULEV-Kategorie zu erreichen.

Die folgende Abbildung zeigt die Anteile der Schadstoffklassen am Jahresumsatz nach LEV II:

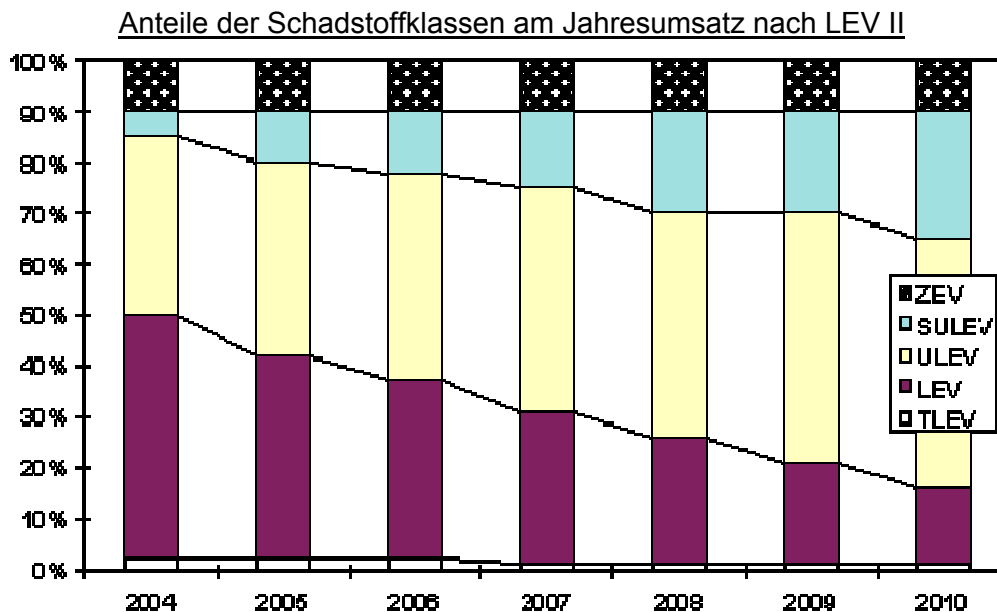


Abbildung 12, Quelle: UBA 2006b

Das Emissionsniveau von Neufahrzeugen soll somit durch Verkaufsförderung von SULEV und ULEV unter Strafandrohung für die Hersteller massiv gesenkt und der Einsatz innovativer Technologien gefördert werden.

Von den kalifornischen Emissionsgesetzen geht eine Signalwirkung aus. Bis 2004 haben bereits fünf US Bundesstaaten die kalifornische Gesetzgebung für Fahrzeugemissionen übernommen. Bis 2009 müssen 10% der verkauften Neufahrzeuge tatsächlich ZEV sein. Das wären in den USA etwa 1,7 Mio. Stück jährlich (Automobil Produktion 2006). Ab 2012 erhöht sich dieser Prozentsatz der Null-Emissions-Fahrzeuge nach der aktuellen Gesetzlage stetig. Zwischen 2012 und 2015 müssten demnach alleine in New Jersey 25.000 Brennstoffzellenfahrzeuge verkauft werden (LBST 2004). Die Entwicklungen sind in ihren Auswirkungen auf die mobile Gesellschaft gegenwärtig noch schwer abzuschätzen.

Neben diesen ZEV Regelungen besteht die Emissionsgesetzgebung sowohl in Kalifornien als auch in den USA aus Vorgaben für Flottenmittelwerte verschiedener Schadstoffemissionen, welche von den Herstellern eingehalten werden müssen. Dazu im Folgenden zwei gesetzliche Vorgaben, wie sie in Europa noch nicht anzutreffen sind. Zunächst die Summe der Kohlenwasserstoffe (HC) ohne Methan (CH_4). Diese werden als NMHC (Non-Methan-Hydrocarbons) bezeichnet.

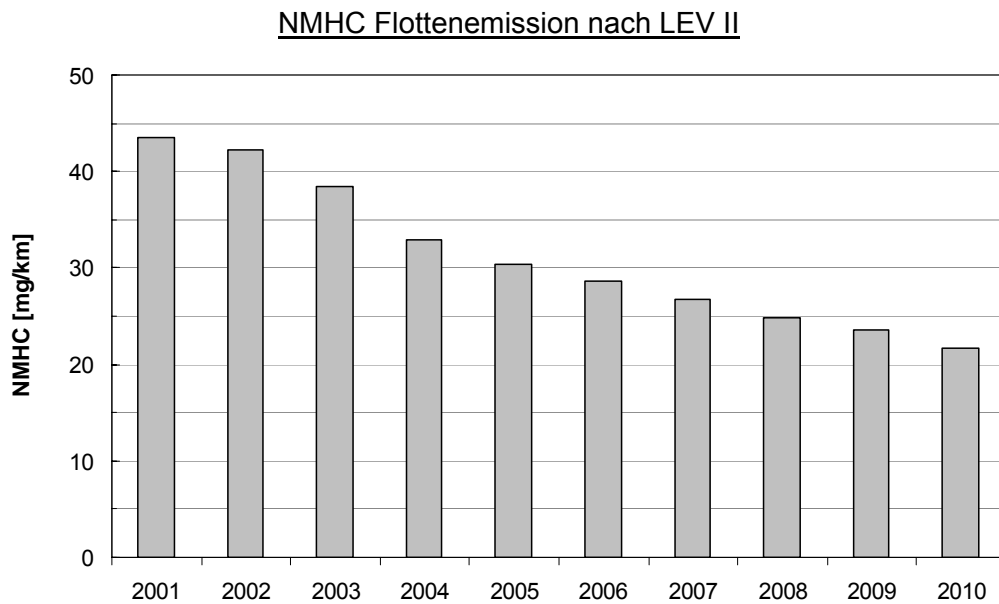


Abbildung 13, Quelle: eigene Darstellung, CARB 2005, 53

Für die Jahre 2001 bis 2010 gelten diese Grenzwerte für Nicht-Methan Kohlenwasserstoffe. Diese Kategorie soll mit der Abgasnorm Euro 6 auch in Europa eingeführt werden. Es kann damit einerseits die Einführung von Erdgasfahrzeugen mit ihren niedrigen Emissionswerten bei Stickstoffoxiden und Partikeln gefördert werden, indem die Kraftstoffverluste, die beispielsweise bei Tankvorgängen unvermeidbar sind, nicht zum Kohlenwasserstoffemissionswert gerechnet werden. Andererseits kann ein reduzierter Ausstoß anderer Kohlenwasserstoffe, die meist gesundheitlich viel bedenklicher sind, bei allen Pkw weiter reduziert werden. Durch eine Zertifizierung der Fahrzeuge wird die Einhaltung der Vorgaben für die verkauften Neuwagen des jeweiligen Modelljahres jedes Herstellers transparent gemacht.

Treibhausgase, hauptsächlich CO₂, werden auch in den USA als problematisch eingeschätzt und deren Ausstoß, der direkt mit der Energieeffizienz der Fahrzeuge korreliert, ist in Kalifornien nach dem LEV II limitiert.

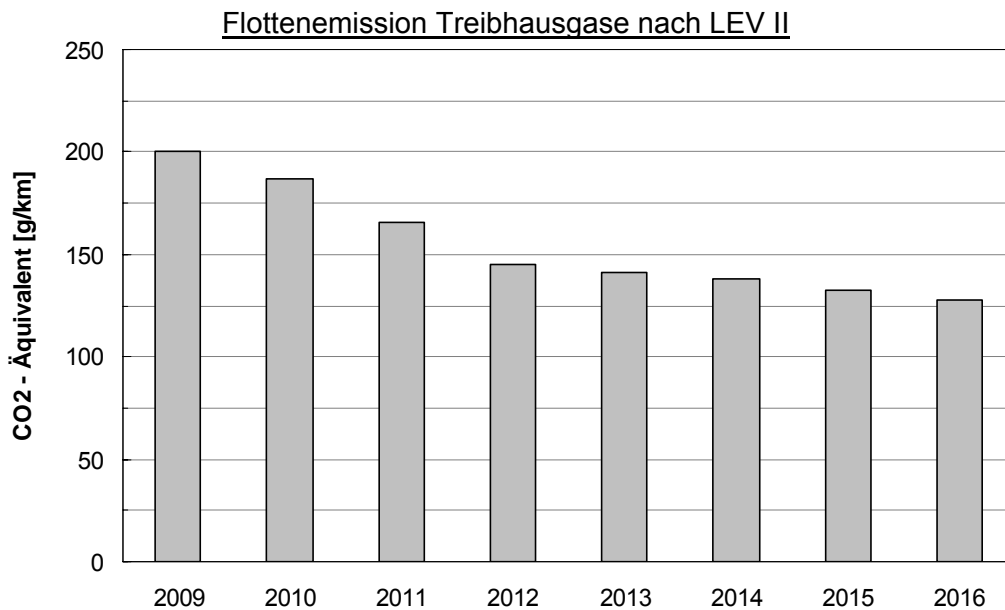


Abbildung 14, Quelle: eigene Darstellung, CARB 2005, 62

Diese Vorgaben für einzelne Automobilhersteller sind das Ergebnis eines Rechtsstreites zwischen dem amerikanischen Automobilherstellerverband und dem Staat Kalifornien, in dem Vorgaben zur Energieeffizienz aufgrund der bestehenden Bundesgesetzgebung für ungültig erklärt wurden. Entsprechend umstritten ist die Formulierung von CO₂-Grenzwerten, welche ähnliche Konsequenzen für konventionelle Verbrennungsmotoren haben, wie beispielsweise Anforderungen an die Fahrleistung je Gallone Benzin, mpg (miles per gallon).

Die US-Programme „National Low-Emission Vehicle“ (NLEV) und „Reformulated Gasoline“ (RFG) sollen auf Bundesebene Pkw-Emissionen reduzieren, wobei die Phase II der Programme, neben der Reduzierung von VOC und anderen Emissionen einen Schwerpunkt auf NO_x legt. Die US-Bundesgesetzgebung sieht eine Reihe von Emissionsstandards von Bin Nr. 1 bis Bin Nr. 8 vor. Bin Nr. 1 entspricht dem kalifornischen ZEV. Bin Nr. 5 stellt dabei den für jeden Schadstoff einzuhaltenden Flotten-Mittelwerte dar, welcher von jedem Automobilproduzenten erreicht werden muss.

Tier 2 Abgasgrenzwerte [mg/km]

Bin Nr.	NO _x	NMOG	CO	PM	HCHO
8	124	78	2610	12	11
7	93	56	2610	12	11
6	62	56	2610	6	11
5	43	56	2610	6	11
4	25	43	1305	6	7
3	19	34	1305	6	7
2	12	6	1305	6	2
1	0	0	0	0	0

Abbildung 15, Quelle: eigene Darstellung, USEPA 2000

Nationale und bundesstaatliche Abgasgesetzgebung existieren nebeneinander, wobei für die Regelung der Energieeffizienz von Neufahrzeugen ausschließlich die Bundesbehörden zuständig sind. Der »Corporate Average Fuel Economy Standard« (CAFE), eine bundesweite Regelung, fordert eine Begrenzung des durchschnittlichen Flottenverbrauchs von Autoherstellern in den USA. Es gibt zwar Möglichkeiten, der Bestrafung zu entgehen, etwa durch außergewöhnliche Unterschreitungen der Standards für den Benzinverbrauch oder den Vertrieb von Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen (McKinsey 2006, 127). Die kalifornische Regierung hat jedoch durch eine rigidere Begrenzung des CO₂-Ausstoßes für Pkw (Skrobek 2006) auch dieses Thema in den internationalen Fokus gerückt. Damit wächst der Druck auf die Autoindustrie weiter.

3. Ableitung und Aufbau der Innovations-Matrix

Der zuvor skizzierte Innovationsdruck sowie die gesetzlichen Regelungen und Normierungen, in denen dieser Druck juristisch verarbeitet und verdichtet wurde, führten dazu, dass im letzten Jahrzehnt weltweit eine Vielzahl von Innovationen in Angriff genommen wurde, um die fossile Verbrennungsmotorik zu optimieren und zu substituieren.

Dieses breitgefächerte Feld antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen lässt sich in Form einer Innovations-Matrix systematisieren und analysieren (Aigle/Marz 2007, 31-39). Im Folgenden werden die Ableitung und der Aufbau dieser Matrix stichpunktartig beschrieben.

3.1. Ableitung

Unterscheidungen und Leitdifferenzen

Die Innovations-Matrix, in der die antriebs- und kraftstofftechnologischen Innovationen zur Optimierung und Substitution der fossilen Verbrennungsmotorik systematisiert sind, leitet sich aus einer grundlegenden Unterscheidung und vier Leitdifferenzen ab.

Die grundlegende Unterscheidung geht auf Schumpeter zurück und betrifft die Trennung von »Invention« und »Innovation«. Eine Innovation ist nicht nur mehr, sondern auch etwas qualitativ anderes als eine Invention, also die bloße Erfindung oder Entdeckung. Inventionen sind nur dann Innovationen, wenn sie sich wirtschaftlich durchsetzen (Debus 2002, 95; Borchert/Goos/Hagenhoff 2003, 14). Oder, formelhaft verkürzt formuliert: innovation = „commercialization of invention“ (Kirchhoff/Walsh 2000, 328) beziehungsweise „innovation = invention + exploitation“ (Roberts 1987, 3).

Die erste Leitdifferenz betrifft den Innovations-Focus. Gestützt auf eine forschungsprogrammatische Skizze Foucaults (Foucault 1993) sowie davon geleitete techniksoziologische Untersuchungen (Marz 1997a; Marz 1997b) unterscheiden wir zwischen *ding-technischen* und *nicht-ding-technischen Innovationen*. Zu den ding-technischen Innovationen gehören alle Innovationen, die unmittelbar darauf gerichtet sind, den harten technischen Kern des Automobils, also den klassischen Verbrennungsmotor antriebs- und/oder kraftstoffseitig zu

substituieren. Zu den nicht-ding-technischen Innovationen gehören Innovationen, die den bedeutungs-, macht- und selbst-technischen (Foucault 1993, 26) Umbau des Autos betreffen. Wir konzentrieren uns im Folgenden ausschließlich auf die ding-technischen Innovationen, also jene Innovationen, die sowohl landläufig als auch systemsoziologisch (Luhmann 1991, 93-110; Luhmann 2000, 364; Barben 1996, 222-226) unter »technischen Neuerungen« verstanden werden.

Die zweite Leitdifferenz betrifft das Innovations-Paradigma. Ausgehend von Untersuchungen zum Charakter ding-technischer Innovationsprozesse in der Automobilindustrie und des dabei entwickelten Begriffs der „Stagnovation“ (Canzler/Marz 1997), unterscheiden wir zwischen *stagnovativen und nicht-stagnovativen Innovationen*. Zu den stagnativen Innovationen gehören all jene Innovationen, die lediglich den technischen Kern des Automobils, also die konventionelle Verbrennungsmotorik optimieren. Nicht-stagnovative Innovationen sind jene, die das Paradigma des klassischen thermischen Antriebs nicht stabilisieren, sondern entweder kraftstoff- und/oder antriebsseitig auflösen.

Die dritte Leitdifferenz betrifft den Innovations-Grad. Hier unterscheiden wir zwischen *inkrementalen und radikalen Innovationen*. Während es sich bei inkrementalen Innovationen um kleine, kontinuierlich stattfindende Neuerungen handelt, stellen radikale Innovationen große, diskontinuierlich auftretende Innovationen dar (Hauschildt 1993, 12; Becker 2004, 94-97). Inkrementale Innovationen sind Verbesserungs-Innovationen, radikale Innovationen sind signifikante, richtungsändernde Basis-Innovationen (Konrad/Scheer 2003, 2; Debus 2002, 92-93; Kroy 1995; Deutsch 1949, 26;). Oder, zugespitzt formuliert: Inkrementale Innovationen sind „Innovatiönchen“ (Braun/Feige/Sommerlatte 2001), radikale Innovationen sind „Quantensprünge“ (Nill/Konrad 2001, 28; Weider/Marz 2005; Knie 2006, 55-58, 119-207.)

Die vierte Leitdifferenz betrifft die Innovations-Reichweite. Hier greifen wir auf Arbeiten zu Innovations-Frameworks (Abernathy/Clark 1985; Henderson/Clark 1990) und Systeminnovationen (Konrad/Scheer 2003) zurück und unterscheiden zwischen *modularen und systemischen Innovationen*. Modulare Innovationen betreffen, antriebs- und/oder kraftstofftechnologisch, lediglich die Verbrennungsmotorik des einzelnen Kraftfahrzeugs. Systemische Innovationen reichen darüber hinaus in die gesamten vorgelagerten Produktionsketten (Aigle/Marz 2007, 20).

Innovations-Typologie

Die anhand der vier Leitdifferenzen unterschiedenen Innovations-Typen stehen nicht beziehungslos nebeneinander. In vielen innovationstheoretischen Arbeiten werden Zusammenhänge zwischen diesen Typen, insbesondere zwischen inkrementalen, radikalen, modularen und systemischen Innovationen herausgearbeitet. Dies geschieht aus verschiedenen konzeptionellen Perspektiven und auch mit unterschiedlichen Terminologien. Dabei werden diese Innovations-Typen vielfach über unterschiedliche Zwei-Felder- (Leifer 2005, 14), Vier-Felder-(Abernathy/Clark 1985, 8; Debus 2002, 97; Gambardella 2006, 14) oder Mehr-Felder-Matrizen (Kroy 1995, 9) miteinander in Beziehung gesetzt. Ausgehend von diesen Überlegungen sind in der folgenden Abbildung vier Verbindungslinien zwischen diesen Innovations-Typen dargestellt, die eine weitere Differenzierung und Systematisierung der bisher entwickelten Innovations-Typologie gestatten:

Innovationen 1. und 2. Grades

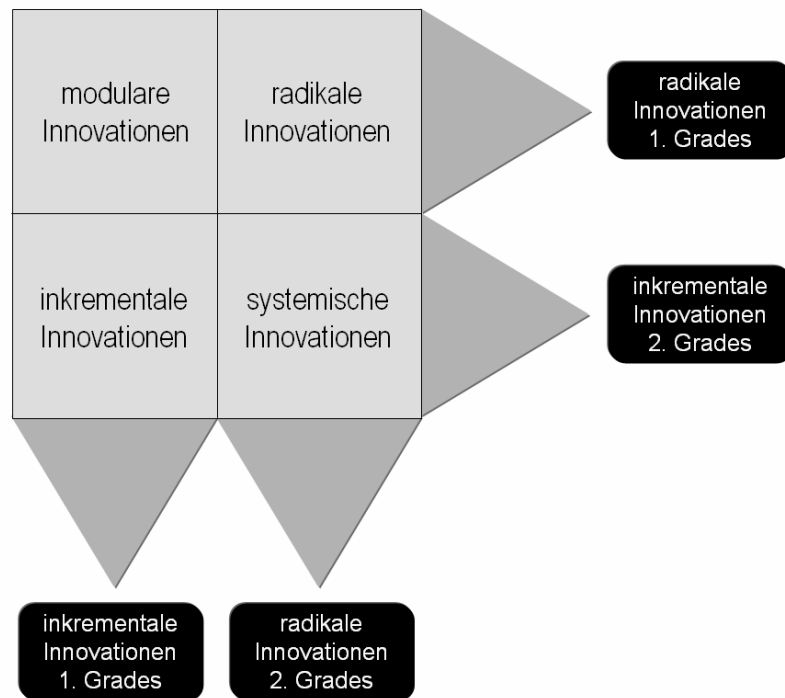


Abbildung 16, Quelle: eigene Darstellung

Diese vier Verbindungslinien zwischen inkrementalen, radikalen, modularen und systemischen Innovationen ermöglichen zweierlei:

Einerseits lassen sich so inkrementale und radikale Innovationen auch im Hinblick auf ihre jeweilige Reichweite unterscheiden. Inkrementale und radikale Innovationen 1. Grades besitzen nur eine begrenzte, nämlich modulare Reichweite. Sie betreffen lediglich die Technologie des einzelnen Fahrzeugs. Inkrementale und radikale Innovationen 2. Grades besitzen demgegenüber eine größere, und zwar systemische Reichweite. Sie betreffen nicht nur das einzelne Fahrzeug, sondern darüber hinaus auch die gesamten antriebs- und/oder kraftstofftechnologischen Produktionsketten.

Andererseits gestatten es diese vier Verbindungslinien umgekehrt auch, den Innovationsgrad von modularen und systemischen Innovationen zu bestimmen. Sowohl modulare (1. Grad) als auch systemische (2. Grad) Innovationen können jeweils inkremental oder radikal sein.

Innovationsraum

Vor dem Hintergrund der zuvor entwickelten Differenzierungen werden nun in der folgenden Abbildung die beiden Hauptinnovations-Achsen bei der Optimierung und Substitution der fossilen Verbrennungsmotorik, nämlich die antriebs- und die kraftstofftechnologische Innovations-Achse, wie folgt aufeinander bezogen:

Kraftstoff- und antriebstechnologische Innovationen

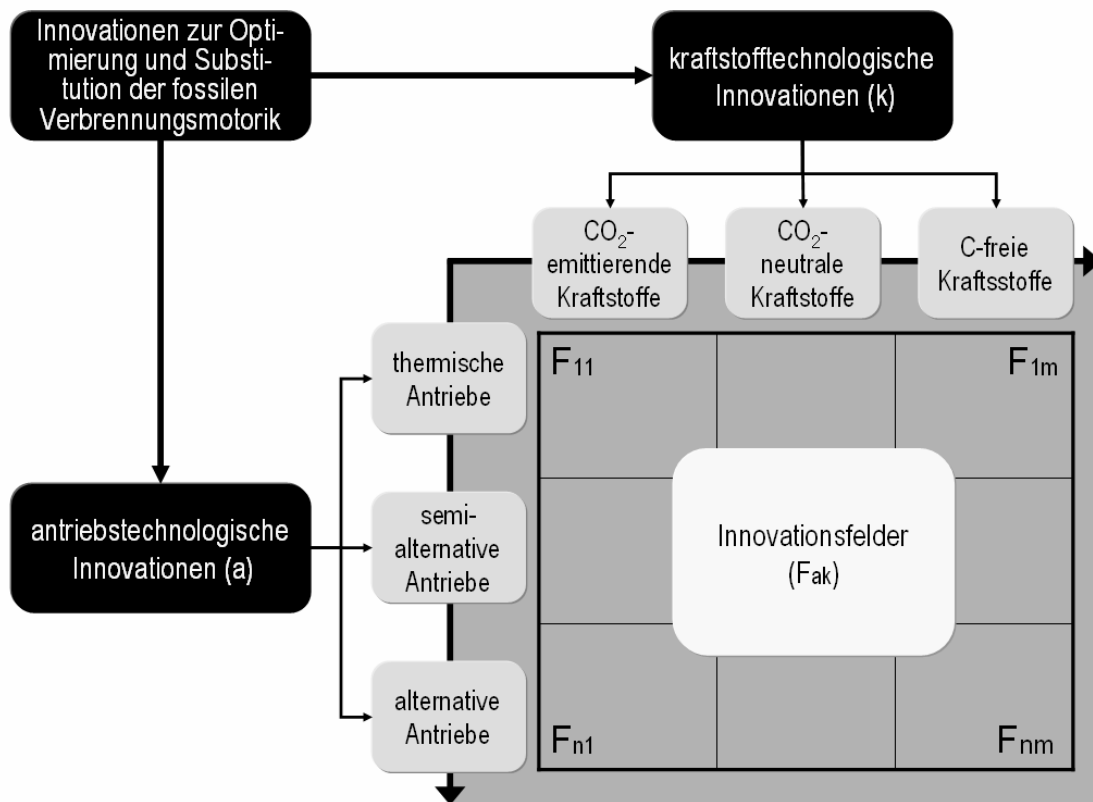


Abbildung 17, Quelle: eigene Darstellung

Durch die antriebstechnologische Achse a und die kraftstofftechnologische Achse k wird ein zweidimensionaler Innovationsraum mit unterschiedlichen Innovationsfeldern F_{ak} aufgespannt, wobei der Index a die Position der Innovation auf der antriebstechnologischen Achse und der Index k die Position der Innovation auf der kraftstofftechnologischen Achse angeben.

Wenn die Innovationen auf der antriebstechnologischen Achse von 1-n und die Innovationen auf der kraftstofftechnologischen Achse von 1-m skaliert sind, dann gilt:

$$1 \leq a \leq n; 1 \leq k \leq m$$

Je kleiner also a , desto konventioneller der Antrieb, je größer a , desto alternativer der Antrieb. Und: Je kleiner k , desto konventioneller der Kraftstoff, je größer k , desto alternativer der Kraftstoff. Das Innovationsfeld F_{11} (links oben) ist sowohl das antriebs- als auch das kraftstofftechnologisch konventionellste Feld. Das Innovationsfeld F_{nm} (rechts unten) ist das antriebs- und kraftstofftechnologisch alternativste Feld.

3.2. Aufbau

Die zuvor entwickelte Systematik der bei der Optimierung und Substitution der fossilen Verbrennungsmotorik zu analysierenden Innovations-Typen lässt sich nun in folgender Innovations-Matrix verdichten:

<div>Kraftstoff (k)</div> <div>Antrieb (a)</div>			CO ₂ -emittierende Kraftstoffe						CO ₂ -neutrale Kraftstoffe						C-freie Kraftstoffe			
			Konventionell		Nicht-konventionell				Semi-alternativ						Alternativ			
			Kohlenwasserstoffe					SynFuels		Öle		Alkohole		Gase	Strom (13)	Wasserstoff		
			Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio- diesel (RME) (8)	Pflanzen- öle (9)	Bio- Ethanol (10)	Bio- Metha- nol (11)	Biogas (12)		Wasser- stoff LH ₂ (14)	Wasser- stoff CGH ₂ (15)	
Thermische Antriebe	Konventionell	4-Takt-Hubkolbenmotor (1)													X			
		2-Takt-Hubkolbenmotor (2)				/	/	/	/	/	/	/	/	/	X	/	/	
	Nicht-konventionell	Wankelmotor (3)		/		/	/	/	/	/	/	/	/	X	/			
		Sonstige Verbrennungsprinzipien (4)		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	X	/	/		
Hybrid-Antriebe	Semi- alternativ	Milde Hybride mit Batterie (one-mode) (5)	ther- misch			/	/					/	/	/	X	/	/	
			elek- trisch									/	/	/	X	/	/	
		Vollhybride mit Batterie (two-mode) (6)	ther- misch			/	/					/	/	/	X	/	/	
			elek- trisch			/	/					/	/	/			/	/
Elektrische Antriebe	Alternativ	Batterie-Elektroantrieb (7)		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	
		Brennstoffzellen-Elektroantrieb (8)		/	/	/	/	/	/	/	/	/		/	X			

Stagnovative Innovationen

Inkrementale Innovationen
1. Grades

Inkrementale Innovationen
2. Grades

Radikale Innovationen
1. Grades

Radikale Innovationen
2. Grades

X Technologisch
ausgeschlossen

/ Innovationsräume

Abbildung 18: Innovations-Matrix, Quelle: eigene Darstellung

Diese Innovations-Matrix besitzt zwei Innovations-Dimensionen, eine Antriebs-Dimension a (Zeilen) und eine Kraftstoff-Dimension k (Spalten). Dabei gibt der Index a die Position einer Innovation auf der antriebstechnologischen Achse und der Index k die Position einer Innovation auf der kraftstofftechnologischen Achse an. Der Index a läuft von 1-8 (Zeile 1-8), der Index k von 1-15 (Spalte 1 bis 15). Beide Innovationsachsen sind jeweils so skaliert, dass das Innovationsniveau tendenziell mit steigender Index-Nummer zu- und mit sinkender Index-Nummer abnimmt. Auf der kraftstofftechnologischen Achse ist beispielsweise Diesel ($k=1$) konventioneller als CGH_2 ($k=15$) und auf der antriebstechnologischen Achse ist der 4-Takt-Hubkolbenmotor ($a=1$) konventioneller als der Brennstoffzellen-Elektroantrieb ($a=8$).

Durch die beiden Innovations-Dimensionen a und k wird eine Fahrzeug-Konfiguration $F_{a/k}$ (Feld) definiert. Dabei gibt der Index a die Position der Konfiguration auf der antriebstechnologischen Achse und der Index k die Position dieser Konfiguration auf der kraftstofftechnologischen Achse an. Die Felder $F_{a/k}$ laufen von $F_{1/1}$ (Zeile 1/Spalte 1) über $F_{1/15}$ (Zeile 1/Spalte 15) und $F_{8/1}$ (Zeile 8/Spalte 1) bis $F_{8/15}$ (Zeile 8/Spalte 15). Entsprechend den Achsenskalierungen nimmt das Innovationsniveau der Fahrzeug-Konfigurationen mit steigenden Index-Nummern zu und mit sinkenden Index-Nummern ab. So ist zum Beispiel die Konfiguration $F_{1/1}$ (4-Takt-Hubkolbenmotor/Diesel) konventioneller als die Konfiguration $F_{3/2}$ (Wankelmotor/Benzin) und diese wiederum weniger alternativ als die Konfiguration $F_{8/14}$ (Brennstoffzellen-Elektroantrieb/ LH_2).

Diese Innovations-Matrix ermöglicht eine ebenso übersichtliche wie differenzierte Analyse und Clusterung der auf die Optimierung und Substitution der fossilen Verbrennungsmotorik zielenden Innovationen (Aigle/Marz 2007, 31-39). Allerdings ist diese Matrix primär eine qualitative und keine quantitative Systematik. Technische, ökonomische, ökologische und andere Kenngrößen, die einen direkten detaillierten Vergleich unterschiedlicher Fahrzeug-Konfigurationen sowie eine daraus abgeleitete Evaluation der unterschiedlichen Innovationen gestatten, sind in ihr nicht enthalten. Um dies zu ermöglichen, leiten wir im Folgenden aus der qualitativen Innovations-Matrix eine quantifizierbare Evaluations-Matrix ab.

4. Ableitung und Aufbau der Evaluations-Matrix

4.1. Ableitung

Um die Evaluations- aus der Innovations-Matrix abzuleiten, greifen wir zunächst auf ein spezielles Klassifikationsverfahren zurück, das unter anderem auch in Analysen mit unscharfen Verfahren Anwendung findet, und zwar die Clusterung (Boklisch 1987, 53-72). Dabei clustern wir die Innovations-Matrix nach einem Verfahren, das man vielleicht am besten als Ausschluss-Verfahren bezeichnen könnte.

Mit diesem Verfahren werden aus der Innovations-Matrix alle Fahrzeugkonfigurationen $F_{a/k}$ ausgeschlossen, die bislang kein Innovationsniveau erreicht haben, also alle Konfigurationen, die entweder technologisch nicht realisierbar sind (gekennzeichnet mit »X«) oder die lediglich Inventionsräume darstellen (gekennzeichnet mit »/«). Diese Konfigurationen werden als weiße Leerfelder dargestellt. Damit sieht die modifizierte Innovations-Matrix so aus:

Modifizierte Innovations-Matrix

Kraftstoff (k) Antrieb (a)			CO ₂ -emittierende Kraftstoffe					CO ₂ -neutrale Kraftstoffe					C-freie Kraftstoffe			
			Konventionell		Nicht-konventionell			Semi-alternativ					Alternativ			
			Kohlenwasserstoffe			SynFuels		Öle		Alkohole		Gase	Strom	Wasserstoff		
			Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio- diesel (RME) (8)	Pflanzen- öle (9)	Bio- Ethanol (10)		Bio- Metha- nol (11)	Biogas (12)	Wasser- stoff LH ₂ (14)
Thermische Antriebe	Konventionell	4-Takt- Hubkolbenmotor (1)														
		2-Takt- Hubkolbenmotor (2)														
	Nicht- konventionell	Wankelmotor (3)														
		Sonstige Verbrennungs- prinzipien (4)														
Hybrid-Antriebe	Semi- alternativ	Milde Hybride mit Batterie (one-mode) (5)	ther- misch													
		elek- trisch														
Elektrische- Antriebe	Alternativ	Vollhybride mit Batterie (two-mode) (6)	ther- misch													
		elek- trisch														
Elektrische- Antriebe	Alternativ	Batterie- Elektroantrieb (7)														
		Brennstoffzellen- Elektroantrieb (8)														

Abbildung 19, Quelle: eigene Darstellung

Damit »schrumpfen« die ursprüngliche Innovations-Matrix und die Menge der zu betrachtenden Fahrzeugkonfigurationen erheblich zusammen. In dieser »geschrumpften« Matrix wird nun die Kraftstoff-Achse k um 90° nach unten gedreht, so dass sie neben der Antriebs-Achse (a) liegt. Durch diese beiden Achsen ist dann die Konfigurations-Achse (a/k) definiert. Damit sieht die Kernstruktur der »gedrehten« Innovations-Matrix folgendermaßen aus:

Kernstruktur der »gedrehten« Innovations-Matrix

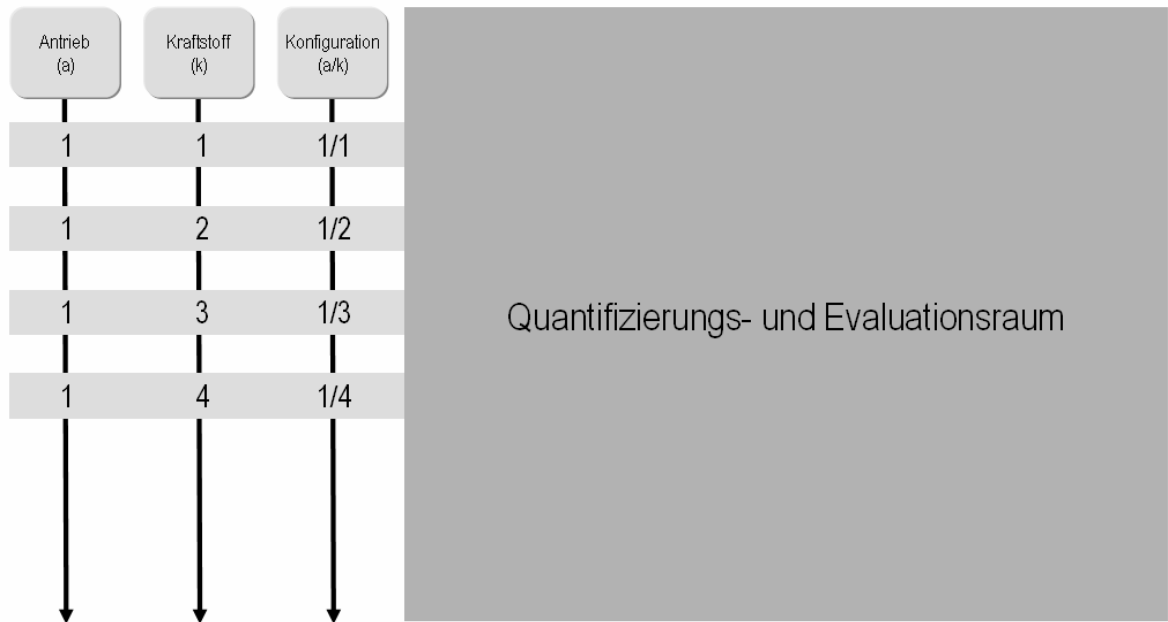


Abbildung 20, Quelle: eigene Darstellung

Aus der modifizierten Innovations-Matrix aus Abbildung 19 werden zunächst auf der Antriebs-Achse (a) alle Antriebe von 1-n der Reihe nach sortiert. Anschließend werden auf der Kraftstoff-Achse (k) die zu jedem Antrieb gehörenden Kraftstoffe 1-m ebenfalls in aufsteigender Reihenfolge geordnet. Durch diese beiden Sortierungen werden die belegten Felder aus der modifizierten Innovations-Matrix schrittweise auf der Konfigurations-Achse a/k geordnet.

Diese Kernstruktur der »gedrehten« Innovations-Matrix bildet nun die Basis für die Evaluations-Matrix. Es ist nun nämlich möglich, eine Evaluations-Achse (e) mit unterschiedlichen Evaluationsbereichen, beispielsweise »Technik«, »Ökonomie«, »Ökologie«, »Ranking« einzuführen, die sich ihrerseits wieder in Teilbereiche differenzieren lassen. Die dadurch definierte Grundstruktur der Evaluations-Matrix sieht dann folgendermaßen aus:

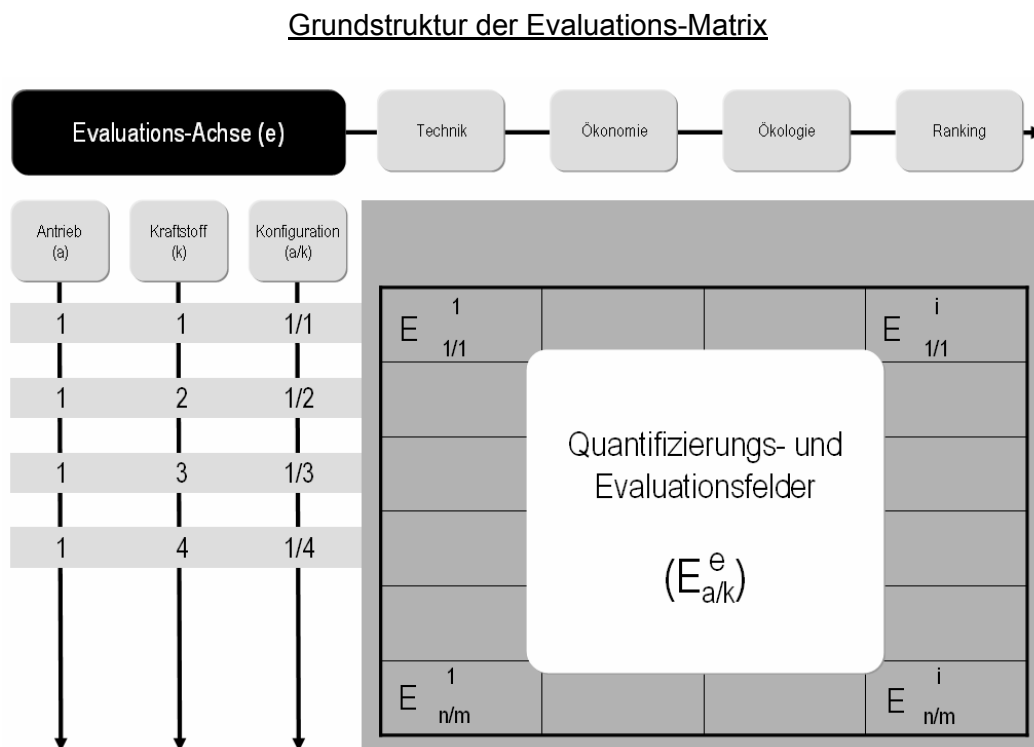


Abbildung 21, Quelle: eigene Darstellung

Durch die drei Achsen der Innovations-Matrix (Antriebs, Kraftstoff- und Konfigurations-Achse) einerseits und die Evaluations-Achse andererseits wird nun ein zweidimensionaler Raum mit unterschiedlichen Quantifizierungs- und Evaluationsfeldern E aufgespannt, wobei der Index a/k eine Fahrzeugkonfiguration aus der modifizierten Innovations-Matrix und der Index e die Position dieser Konfiguration auf der Evaluations-Achse angeben.

Wenn nun die Innovationen auf der Antriebsachse von 1-n, die Innovationen auf der Kraftstoff-Achse von 1-m und die Kennziffern auf der Evaluations-Achse von 1-i geordnet sind, dann gilt:

$$1 \leq a \leq n$$

$$1 \leq k \leq m$$

$$1 \leq e \leq i$$

4.2. Aufbau

4.2.1. Struktur

Die zuvor skizzierte abstrakt-formale Ableitung ermöglicht es, die Evaluations-Matrix diskursiv offen zu halten. Das heißt, die Matrix kann jederzeit sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig um neue Fahrzeug-Konfigurationen $F_{a/k}$ erweitert werden. Ebenso können auch neue Evaluierungs-Bereiche auf der e-Achse eingeführt beziehungsweise bestehende ausdifferenziert werden.

Ziel dieses Kapitels ist es, diesen allgemeinen Ansatz einer Evaluations-Matrix empirisch zu quantifizieren und anhand konkreter Fahrzeug-Modelle zu illustrieren. Hierfür wird zunächst für jede als Innovation identifizierte Fahrzeug-Konfiguration ein Beispielmodell gewählt, dessen Kennwerte dann anschließend in die Quantifizierungsfelder eingetragen werden.

Auf den ersten Blick könnte es scheinen, dass es sich bei dieser Quantifizierung lediglich um eine mehr oder weniger große Fleißaufgabe handelt, bei der die entsprechenden Kennwerte der Beispielmodelle Zeile für Zeile aus einer, schlimmstenfalls aus mehreren Datenbanken zusammengetragen werden. Dieser Schein trügt. Wie in anderen Mobilitätsstatistiken (Hunsicker/Knie/Lange 2007) ist auch hier die Differenziertheit, Validität und Vergleichbarkeit der vorhandenen Daten bei genauerer Prüfung völlig unzureichend. Die folgenden Feldeinträge der Matrix sind deshalb nicht nur das Ergebnis sehr umfangreicher Recherchen, sondern sie basieren zu einem gut Teil auch auf eigenen technischen, physikalischen und chemischen Berechnungen und Überlegungen.

Die Datenqualität und die Datenquellen werden im Kapitel „4.2.2. Daten“ (S. 42-43) zusammenfassend und anschließend im Kapitel „4.2.3 Evaluations-Bereiche“ (S. 43-57) detailliert diskutiert. Die Quellen für jedes Matrix-Feld sind im Kapitel „7.1 Quellen zur Evaluations-Matrix“ gesondert (S. 79-85) zusammengestellt.

Die Evaluations-Matrix sieht damit wie folgt aus:

Fahrzeug-Konfiguration (a, k) \ Evaluations-achse (e)				Technik						
				Gewicht (1)	Leistung (2)	Hubraum (3)	Elasti- zität (4)	Beschleu- nigung (5)	Geschwin- digkeit (6)	Eta (7)
Antrieb (a)	Kraftstoff (k)	Konfig. (a/k)	Beispiel Fahrzeug	[kg]	[kW]	[ccm]	[s] (60- 100 km/h)	[s] (0- 100km/h)	[km/h]	[%]
4-Takt- Hubkolben- motor (1)	Diesel (1)	(1/1)	VW Golf V TDI	1360	77	1896	13,4	12,0	187	25
	Benzin (2)	(1/2)	Ford Focus 5T	1360	92	1796	12,1	10,3	198	20
	Autogas LPG (3)	(1/3)	Ford Focus 4T LPG	1250	86	1796	□	□	198	16
	Erdgas LNG (4)	(1/4)	□	□	□	□	□	□	□	□
	Erdgas CNG (5)	(1/5)	Opel Astra Caravan	1360	71	1598	12,6	12,6	177	17
	GTL (6)	(1/6)	VW Golf V TDI	1590	77	1896	13,4	12,0	187	25
	BTL (7)	(1/7)	VW Golf V TDI	1590	77	1896	13,4	12,0	187	25
	Biodiesel RME (8)	(1/8)	VW Golf V TDI	1590	77	1896	13,4	12,0	187	25
	Pflanzenöl (9)	(1/9)	VW Golf V TDI	1590	77	1896	13,4	12,0	187	25
	Bio-Ethanol (10)	(1/10)	Ford Focus FFV	1360	92	1798	12,1	10,3	195	21
	Bio-Methanol (11)	(1/11)	VW Jetta FVV	1470	75	1800	□	14,7	186	15
	Biogas (12)	(1/12)	Opel Astra Caravan	1360	71	1598	12,6	12,6	177	17
	Wasserstoff LH ₂ (14)	(1/14)	BMW Hydrogen7	2460	191	5972	□	9,5	230	16
	Wasserstoff CGH ₂ (15)	(1/15)	Ford Focus Cmax	□	82	2300	□	10,8	179	□
2-Takt- Hubkolben- motor (2)	Diesel (1)	(2/1)	□	□	□	□	□	□	□	□
	Benzin (2)	(2/2)	Trabant P 601L	615	20	595	□	23,7	100	15
Winkel- motor (3)	Benzin (2)	(3/2)	Mazda RX- 8	1390	141	1308	9,6	7,4	223	13
	Wasserstoff CGH ₂ (15)	(3/15)	Mazda RX- 8	1460	80	1308	□	□	170	13
Mild Hybrid (5)	Diesel (1)	(5/1)	DC Bluet.- Hybrid	1995	155 + 24	2987	□	7,2	250	22
	Benzin (2)	(5/2)	Honda Civic IMA	1270	61 + 15	1339	□	12,8	177	30
	Erdgas CNG (5)	(5/5)	Honda Civic IMA	□	□	□	□	□	□	□
	GTL (6)	(5/6)	Bluetec- Hybrid	1995	179	2987	□	7,2	250	22
	BTL (7)	(5/7)	Bluetec- Hybrid	1995	179	2987	□	7,2	250	22
	Biodiesel RME (8)	(5/8)	Bluetec- Hybrid	1995	179	2987	□	7,2	250	22
Voll Hybrid (6)	Diesel (1)	(6/1)	Peugeot 307	1318	66 + 23	1560	□	12,4	180	38
	Benzin (2)	(6/2)	Toyota Prius II	1400	57 + 50	1497	□	12	170	34
	Erdgas CNG (5)	(6/5)	Toyota Prius II	1450	52 + 50	1497	□	12	170	28
	GTL (6)	(6/6)	Peugeot 307	1318	66 + 31	1560	□	12,4	181	38
	BTL (7)	(6/7)	Peugeot 307	1318	66 + 31	1560	□	12,4	181	38
	Biodiesel RME (8)	(6/8)	Peugeot 307	1318	66 + 31	1560	□	12,4	181	38
	Strom (13)	(6/13)	Toyota Prius II	1130	50	X	X	□	55	95
Batt.-El.- antrieb (7)	Strom (13)	(7/13)	Renault Twingo El.	920	11	X	6*2)	20	120	69
Brennstoff- zellen- Elektro- antrieb (8)	Bio-Methanol (11)	(8/11)	DC Necar 5	1450	55	X	□	16	150	30
	Wasserstoff LH ₂ (14)	(8/14)	Opel HydroGen3	1650	60	X	□	16	150	36
	Wasserstoff CGH ₂ (15)	(8/15)	DC F-Cell	n.a.	65	X	□	16	145	37

e a/k	Ökonomie				Ökologie						Ranking	
	Ver- brauch (8)	Ver- brauch (9)	Ver- brauchs- kosten (10)	Neu- preis (11)	CO ₂ (12)	CO (13)	HC (14)	NO _x (15)	Ruß (PM) (16)	Lärm (17)	CO ₂ (18)	CO ₂ /kW (19)
	[l/100 km]	[l/100 km] Benzinäg.	[€/100 km]	[€]	[g/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[dB(A)]	abs. Platz (e=12)	rel. Platz (e=12/e=2)
(1/1)	5	5,7	5,72	19050	135	47	12	191	19	79 (73)	12.	12. (1,75)
(1/2)	7,0	7,0	9,32	20125	167	413	81	34	<5	82 (72)	14.	13. (1,84)
(1/3)	10,5	8,4	6,64	20125 +2400	168	908	48	6	<5	84 (71)	15.	15. (1,95)
(1/4)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
(1/5)	6700	7,9	3,44	20315	119	140	64	25	<5	83 (72)	8.	9. (1,68)
(1/6)	5,2	5,7	□	19050	135	4	4	179	14	79 (73)	12.	12. (1,75)
(1/7)	5,3	5,7	□	19050	135	11	4	129	17	79 (73)	12.	12. (1,75)
(1/8)	5,4	5,7	5,58	19050	133	28	5	197	11	79 (73)	11.	11. (1,73)
(1/9)	5,2	5,7	4,14	19050 +3.880	131	24	7	220	10	79 (73)	10.	10. (1,70)
(1/10)	9,1	6,7	8,37	18075	138	330	49	32	<5	82 (72)	13.	10. (1,70)
(1/11)	19,2	9,8	□	19876 +116	209	124	6	186	12	□	16.	16. (2,79)
(1/12)	6700	7,9	4,50	20315	119	140	64	25	<5	83 (72)	8.	9. (1,68)
(1/14)	50,8	13,9	25,40	72300 +5000	5	<10	<1	1-4	<5	□	2.	2. (0,03)
(1/15)	16176	5,3	9,71	21175 +5000	≈5	<10	<1	<7	<5	□	2.	3. (0,06)
(2/1)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
(2/2)	6	6	7,99	6500	130	8789	8094	42	□	82	9.	17. (6,50)
(3/2)	10,8	10,8	14,37	28235	267	265	48	11	<5	79 (73)	17.	14. (1,89)
(3/15)	36397	12	21,84	2860 * ¹⁾	≈5	<10	<1	<7	<5	□	2.	3. (0,06)
(5/1)	7,7	8,8	8,81	41800	(204)	(33)	(19)	(198)	(3)	□	16.	7. (1,14)
(5/2)	4,6	4,6	6,12	23200	116	309	38	36	<5	78 (72)	7.	8. (1,53)
(5/5)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
(5/6)	8,0	8,8	□	41800	(204)	(3)	(7)	(186)	(2)	□	16.	7. (1,14)
(5/7)	8,1	8,8	□	41800	(204)	(8)	(7)	(134)	(3)	□	16.	7. (1,14)
(5/8)	8,3	8,8	8,59	41800	(201)	(20)	(8)	(204)	(2)	□	15.	7. (1,14)
(6/1)	3,4	3,9	3,89	18300 +6000	90	138 (111)	17 (23)	190 (170)	22 (1)	□	4.	5. (1,01)
(6/2)	4,3	4,3	5,72	24250	104	180	20	10	<5	66 (69)	6.	4. (0,97)
(6/5)	4304	5,3	2,70	29258	92	81	8	5	<5	□	5.	3. (0,90)
(6/6)	3,4	3,9	□	18300 +6000	90	12 (10)	7 (9)	178 (159)	16 (1)	□	4.	5. (1,01)
(6/7)	3,4	3,9	□	18300 +6000	90	32 (26)	6 (8)	129 (115)	20 (1)	□	4.	5. (1,01)
(6/8)	3,4	3,9	3,52	18300 +6000	89	83 (67)	7 (9)	196 (175)	13 (1)	□	4.	5. (1,01)
(6/13)	15kWh	1,6	3,00	31584	X	X	X	X	X	57	1.	1. (0)
(7/13)	15kWh	1,6	3,00	22581	X	X	X	X	X	57	1.	1. (0)
(8/11)	5,6	2,8	□	19694 +13000	61	0	0	0	0	57	3.	6. (1,11)
(8/14)	16,2	4,5	8,1	20970 +13000	X	X	X	X	X	57	1.	1. (0)
(8/15)	13235	4,4	9,41	19694 +13000	X	X	X	X	X	57	1.	1. (0)

*Werte mit anderem Bezugsmaß: ¹⁾Leasingrate monatlich, ²⁾0-50km/h

() Wert in Klammern: Emissionen mit Dieselpartikelfilter

□ keine Daten recherchierbar. X technologisch ausgeschlossen

Abbildung 22, Quelle: eigene Darstellung

In jedem Evaluations-Feld E der Evaluations-Matrix wird also eine quantitative Aussage über ein Beispielmmodell getroffen. In der modifizierten Innovationsmatrix in Abbildung 19 gibt es 35 Felder, die Fahrzeug-Konfigurationen mit Innovationsniveau darstellen. Diese 35 Konfigurationen werden entsprechend der Abbildung 21 geordnet und finden sich dann als Zeilen in der empirischen Evaluations-Matrix in Abbildung 22 wieder.

Auf der Evaluations-Achse e (Spalten) sind die Evaluations-Größen aufgetragen und den vier Evaluations-Bereichen »Technik«, »Ökonomie«, »Ökologie« und »Ranking« zugeordnet.

Der Bereich Technik umfasst die Spalten e=1 bis 7 und beinhaltet verschiedene technische Kennwerte, die das Fahrzeug charakterisieren. Da Ökologie und Ökonomie eines Fahrzeugs direkt von der eingesetzten Fahrzeugtechnik abhängig sind, besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen »technischem Input« und »ökologischem und ökonomischem Output« der Fahrzeug-Konfiguration. Dieser Zusammenhang lässt sich wie folgt veranschaulichen:

Gewählte Evaluations-Bereiche der Evaluations-Matrix

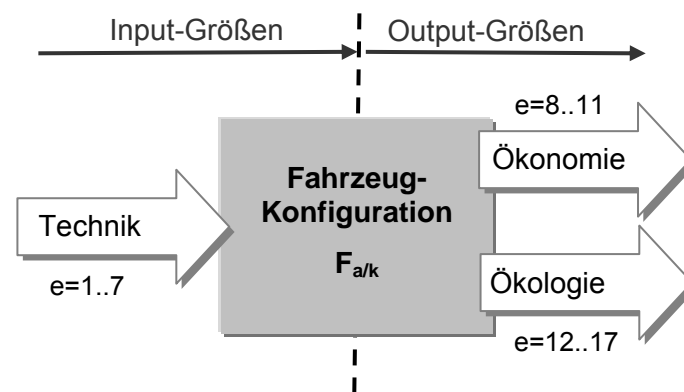


Abbildung 23, Quelle: eigene Darstellung

Mathematisch formuliert stellen die technischen Kennwerte von e=1 bis 7 Variablen dar und die weiteren Werte auf der Evaluationsachse von e=8 bis 17 die Funktionswerte dieser Variablen. Die Funktion selbst definiert die jeweilige Fahrzeug-Konfiguration. Die ökonomischen Funktionswerte sind in den Spalten e=8 bis 11 aufgeführt, die ökologischen Werte in den Spalten e=12 bis 17.

Die beiden letzten Spalten 18 und 19 sollen exemplarisch anhand der Kohlendioxid-Emissionen illustrieren, dass und wie Ranking-Kenngrößen für einen Evaluations-Parameter entwickelt werden können.

Der Quantifizierungsprozess ist kompliziert, weil es kein grundlegendes, von allen akzeptiertes Zahlenwerk gibt. Die Zahlen ergeben sich aus unterschiedlichen Datenquellen mit unterschiedlicher Datenqualität und bei Vergleichen ist zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Beispielmmodelle zur Evaluierung notwendig sind. Zum besseren Verständnis der Matrix-Einträge werden wir im Folgenden deshalb die Wahl der Beispielmmodelle erläutern, eine Einteilung der Modelle in »Basismodelle« und »Derivate« vorstellen und in den weiteren Kapiteln die Datenqualität sowie die Datenquellen erläutern.

Wahl der Beispielm Modelle

Um die für die Evaluation gewählten Beispielm Modelle vergleichen zu können, wurde bei der Auswahl der Fahrzeuge versucht, möglichst die folgenden drei Vergleichskriterien zu berücksichtigen:

- 1. Kriterium: analoge Dimensionierung. Die Beispielm Modelle sollen möglichst aus vergleichbaren Fahrzeugklassen stammen, denn es wäre beispielsweise irreführend, einen Kleinwagen mit einem Sportwagen zu vergleichen. Daher wurden möglichst Fahrzeuge der Kompakt- und unteren Mittelklasse mit einem Hubraum im Bereich von 1,4 bis 2 Liter und Antriebsleistungen von 50 bis 100 kW ausgewählt. Bei den Fahrzeug-Konfigurationen mit alternativen Antriebstechnologien gibt es sowohl »Ausreißer« nach oben als auch nach unten, je nach dem auf welchem Chassis die Entwicklungen erfolgen. Ein »Ausreißer nach oben« ist beispielsweise der Wankelmotor, der gegenwärtig nur im RX-7 von Mazda eingesetzt wird. Mit diesem Motor verfügt der Sportwagen über eine Leistung von 141 kW. Ein »Ausreißer nach unten« sind Batterie-Elektrofahrzeuge. Aufgrund der begrenzten Kapazität der Batterien liegen die Antriebsleistungen der E-Motoren meist unter 50 kW.
- 2. Kriterium: Neuheit. Es wurde versucht, als Beispielm Modelle möglichst die aktuellsten Versionen der entsprechenden Modellklassen zu wählen, um den neuesten Entwicklungsstand für die jeweilige Fahrzeug-Konfiguration widerzuspiegeln. Bei bestimmten Beispielm Modellen, wie zum Beispiel dem Betrieb eines VW-Jetta mit Methanol (F1/10), wurde allerdings die Entwicklung eingestellt und das Beispielm Modell ist daher nicht mehr als »neu« zu bezeichnen.
- 3. Kriterium: ökologische Effizienz. Bei diesem Kriterium geht es darum, für jede Fahrzeug-Konfiguration möglichst ökologische Beispielm Modelle auszuwählen. So wurde in Zeile 1 beispielsweise ein direkteinspritzendes Modell des Golf V aufgeführt. Dieses ist zwar teurer, aber ökologisch effizienter und damit sparsamer als vergleichbare Modelle ohne Direkteinspritzung. Bei dem Golf V als TDI handelt es sich demnach um einen aktuellen (Kriterium 2) und ökologisch-effizienten (Kriterium 3) Wagen der Kompaktklasse (Kriterium 1), welcher allen drei Kriterien gerecht wird.














Für einen aussagefähigen Vergleich der Beispielm Modelle ist neben der Erfüllung der genannten Vergleichskriterien auch eine einheitliche Ausstattung der Fahrzeuge zu beachten. Bei der Wahl der Beispielm Modelle wurde daher versucht, möglichst eine bestimmte Grundausstattung einzuhalten. Technologiebedingt können jedoch Abweichungen vorkommen. So verfügen zum Beispiel Elektroantriebe zwangsweise über stufenlose Automatik-Getriebe und nicht über ein Schaltgetriebe. Die Grundausstattung beinhaltet:

- Sommerbereifung in Standardbreite
- 5-Gang-Schaltgetriebe (Ausnahme Elektroantriebe)
- keine Klimaanlage
- keine gewichtserhöhende Zusatzausstattung
- reguläre Auspuffanlage
- Abgasreinigung gemäß neuestem Entwicklungsstand

Anhand der Vergleichskriterien wurden für die Evaluations-Matrix die folgenden Beispielm Modelle ausgewählt. Dabei kann es vorkommen, dass ein Beispielm Modell mehrere Fahrzeug-Konfigurationen $F_{a/k}$ abdeckt, zum Beispiel dient der Golf V von VW als Beispielfahrzeug für 5

Konfigurationen. Der »normale« Diesel-Golf (F_{1/1}) wird dabei von uns als »Basismodell« bezeichnet, die anderen vier Konfigurationen als »Derivate«. Das Basismodell ist jeweils durch einen Unterstrich zu erkennen. Wir werden auf diese Unterscheidung im Folgenden noch näher eingehen.

Ausgewählte Beispielmodelle der Evaluations-Matrix

	Basismodell		Antriebs- technologie	Fahrzeug- Konfig. F _{a/k}	Krit. 1	Krit. 2	Krit. 3	Entwicklung
	Hersteller	Modellreihe						
	VW	Golf V TDI	4-Takt Hubkolben	<u>1/1*</u> , 1/8, 1/9	✓	✓	✓	Serie
				1/6, 1/7				Feldversuch
	Ford	Focus 4T/5T	4-Takt Hubkolben	<u>1/2</u> , 1/3, 1/10	✓	✓	✓	Serie
		FocusCmax		1/15				Feldversuch
	Opel	Astra Caravan	4-Takt Hubkolben	<u>1/5</u> , 1/12	✓	✓	✓	Serie
	VW	Jetta FVV	4-Takt Hubkolben	<u>1/10</u>	✓	✗	✗	Entwicklung eingestellt
	BMW	7er Reihe (Hydrogen7)	4-Takt Hubkolben	<u>1/14</u>	✗	✓	✓	Feldversuch
	Trabant	P 601L	2-Takt Hubkolben	2/2	✗	✗	✗	Entwicklung eingestellt
	Mazda	RX-8	Wankelmotor	<u>3/2</u>	✗	✓	✓	Serie
				3/15				Feldversuch
	Honda	Civic IMA	Mild-Hybrid	<u>5/2</u>	✓	✓	✓	Serie
	Daimler Chrysler	S320 (Bluetec Hybrid)	Mild-Hybrid	<u>5/1</u> , 5/6, 5/7, 5/8	✗	✓	✓	Feldversuch
	Toyota	Prius II	Voll-Hybrid	<u>6/2</u>	✓	✓	✓	Serie
				6/5, 6/13				Feldversuch
	Peugeot	307	Voll-Hybrid	<u>6/1</u> , 6/6, 6/7, 6/8	✓	✓	✓	Feldversuch
	Renault	Twingo	Batterie	<u>7/13</u>	✗	✓	✓	Kleinserie
	Daimler Chrysler	A-Klasse (f-cell, Necar5)	Brennstoff- zelle	<u>8/11</u> , <u>8/15</u>	✓	✓	✓	Feldversuch
	Opel	HydroGen3 (Zafira)	Brennstoff- zelle	<u>8/14</u>	✓	✓	✓	Feldversuch

*Anmerkung: Bei Unterstrichenen Konfigurationen (a/k) handelt es sich um Basismodelle

Abbildung 24, Quelle: eigene Darstellung. Bildquellen: 1) Einfach-Autos 2007; 2) Wikipedia 2007a 3) H2-Cars 2007; 4) Wikipedia 2007b; 5) Hybrid-Autos 2007; 6) eMercedesBenz 2005; 7) e-mobile 2007a

Die Spalten 1 und 2 stellen die für die Evaluation ausgewählten Basismodelle dar. Aus Spalte 4 wird deutlich, mit welchem Basismodell welche Fahrzeug-Konfigurationen abgedeckt werden kann. Aus den Spalten 5 bis 7 wird ersichtlich, welches Basismodell welche Kriterien erfüllt oder nicht erfüllt. In Spalte 8 wird angegeben, in welchem Entwicklungsstadium sich ein Modell befindet.

Die Beispielmmodelle sind bei vergleichenden Aussagen nicht uneingeschränkt, sondern nur bedingt miteinander vergleichbar, da sie nicht alle drei Kriterien in gleicher Weise erfüllen. Hinzu kommt, dass die Vergleichbarkeit durch die unterschiedliche Reife der Entwicklung eingeschränkt wird. Am Aussagekräftigsten sind deshalb Vergleiche von Fahrzeug-Konfigurationen, welchen dasselbe Basismodell zugrunde liegt.

Trotz dieser Einschränkungen bieten die Beispielmmodelle einen ersten Ansatzpunkt für einen systematisch quantifizierten Vergleich unterschiedlicher Innovationsniveaus.

Einteilung der Beispielmmodelle

Für die weiteren Überlegungen und zum richtigen Verständnis der Datenqualität der Matrixeinträge ist es hilfreich, die vorgestellten Beispielmmodelle – wie bereits erwähnt – in »Basismodelle« und »Derivate« einzuteilen. Derivate ergeben sich beispielsweise durch Umrüstung eines Basismodells auf einen anderen Kraftstoff. Um die von uns vorgenommene Derivatbildung nachvollziehen zu können ist es notwendig, zuerst zwischen Diesel- und Benzinersatzkraftstoffen zu unterscheiden und außerdem auf die Bedeutung der einzelnen in Abbildung 25 aufgeführten Kraftstoffe einzugehen.

Die Abbildung zeigt, welche Kraftstoffarten für Dieselmotoren und welche für Ottomotoren prinzipiell geeignet sind. Motortechnik und Kraftstoffsystem eines Fahrzeugs sind jeweils an die Besonderheiten und Eigenschaften der Kraftstoffe anzupassen. Entscheidend für die Zuordnung ist die Cetanzahl eines Kraftstoffes. Sie gibt Auskunft über dessen Zündwilligkeit und sollte für hochmoderne Dieselmotoren über 52 liegen, ältere Motoren können noch mit einer Cetanzahl von 40 betrieben werden (Umweltdatenbank 2007). Aufgrund der Fremdzündung bei Ottomotoren spielt hier die Cetanzahl keine wesentliche Rolle, sondern hier ist die Oktanzahl entscheidend.

Kraftstoffvarianten für Verbrennungsmotoren

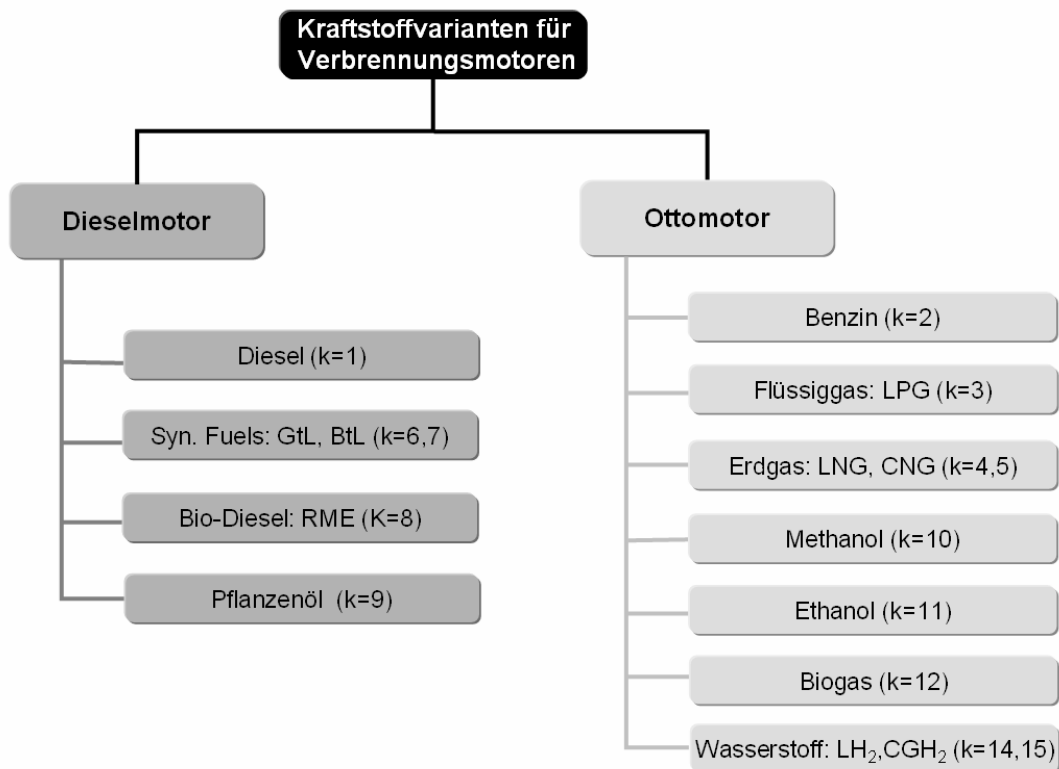


Abbildung 25, Quelle: eigene Darstellung

Zuerst werden diejenigen Kraftstoffe betrachtet, die nach dem Dieselp Prinzip verbrannt werden. Hierzu zählen neben Diesel selbst synthetisch hergestellter Diesel aus Erdgas (GtL, k=6) oder aus Biomasse (BtL, k=7), Biodiesel/RME (k=8) und Pflanzenöl (k=9). Synthetische Kraftstoffe werden bisher in Deutschland noch nicht in Reinform angeboten, sondern lediglich als Beimischungen in Premiumkraftstoffen. Shell bietet beispielsweise solche Kraftstoffe unter dem Label »V-Power an«. Synthetische Kraftstoffe haben den Vorteil, dass sie ohne Umbaumaßnahmen direkt in Dieselmotoren eingesetzt werden können. Biodiesel (k=8) ist der einzig genormte Bio-Kraftstoff und ist flächendeckend an 1.900 Tankstellen (IHK-München 2007, 4) verfügbar. Die Eignung von Fahrzeugen für Biodiesel ist im Einzelfall zu klären und wird bei den Automobilherstellern unterschiedlich gehandhabt. Tendenziell sind neuere Dieselfahrzeuge nicht mehr für Biodiesel freigegeben. Für den Betrieb mit Pflanzenöl (k=9) sind Änderungen am Einspritzsystem, eine Auswechslung der Glühkerzen sowie der Einbau eines Reservekraftstoff- und Nebenstromfilters notwendig. Motorleistung und Kraftstoffverbrauch bleiben allerdings gleich (Geitmann 2004, 63). Das Tankstellen-Verzeichnis auf dem Pflanzenöl-Forum »Pöl-Tec« listet derzeit 267 Pflanzenöl-Tankstellen (Pöl-Tec 2007).

In entsprechend angepassten Ottomotoren können neben Benzin (k=1) auch Flüssiggas LPG (k=3), Erdgas bzw. Biogas (k=5 bzw. 11), (Bio-)Ethanol (k=10), (Bio-)Methanol (k=11) und Wasserstoff (k=12) verbrannt werden. Für Flüssiggas (k=3) besteht eine flächendeckende Infrastruktur mit 1.600 Tankstellen (VDI 2006) für die rund 40.000 gemeldeten LPG-Fahrzeuge (ebenda 2006). Die hierzulande 30.500 (ebenda 2006) registrierten bivalenten Erdgasfahrzeuge können an 650 Tankstellen (BP 2007) Erdgas tanken. Im Juni 2006 eröff-

nete die erste Biogas Tankstelle in Deutschland. Biogas entspricht nach entsprechender chemischer Aufbereitung Erdgas und kann damit in Erdgas-Autos eingesetzt werden. Tankstellen bieten in Deutschland zwischenzeitlich auch Ethanol als E85- (85% Ethanol und 15% Benzin) und E50-Gemische für speziell modifizierte Autos mit so genannten »Flexifuel-Motoren« an. Bundesweit gibt es mittlerweile rund 40 öffentliche Bio-Ethanol-Tankstellen (EnRo 2006). Für die Erprobung von Feldversuchsfahrzeugen und Prototypen stehen rund 20 Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland zur Verfügung (H2-Stations 2007). Um die Relation nicht zu verlieren, sei daran erinnert, dass es in Deutschland insgesamt knapp 15.000 öffentliche Tankstellen (ADAC 2007a) gibt.

Die nun folgende Abbildung 26 zeigt die vorgenommene Einteilung der gewählten Beispielmodelle in Derivate und Beispielmodelle.

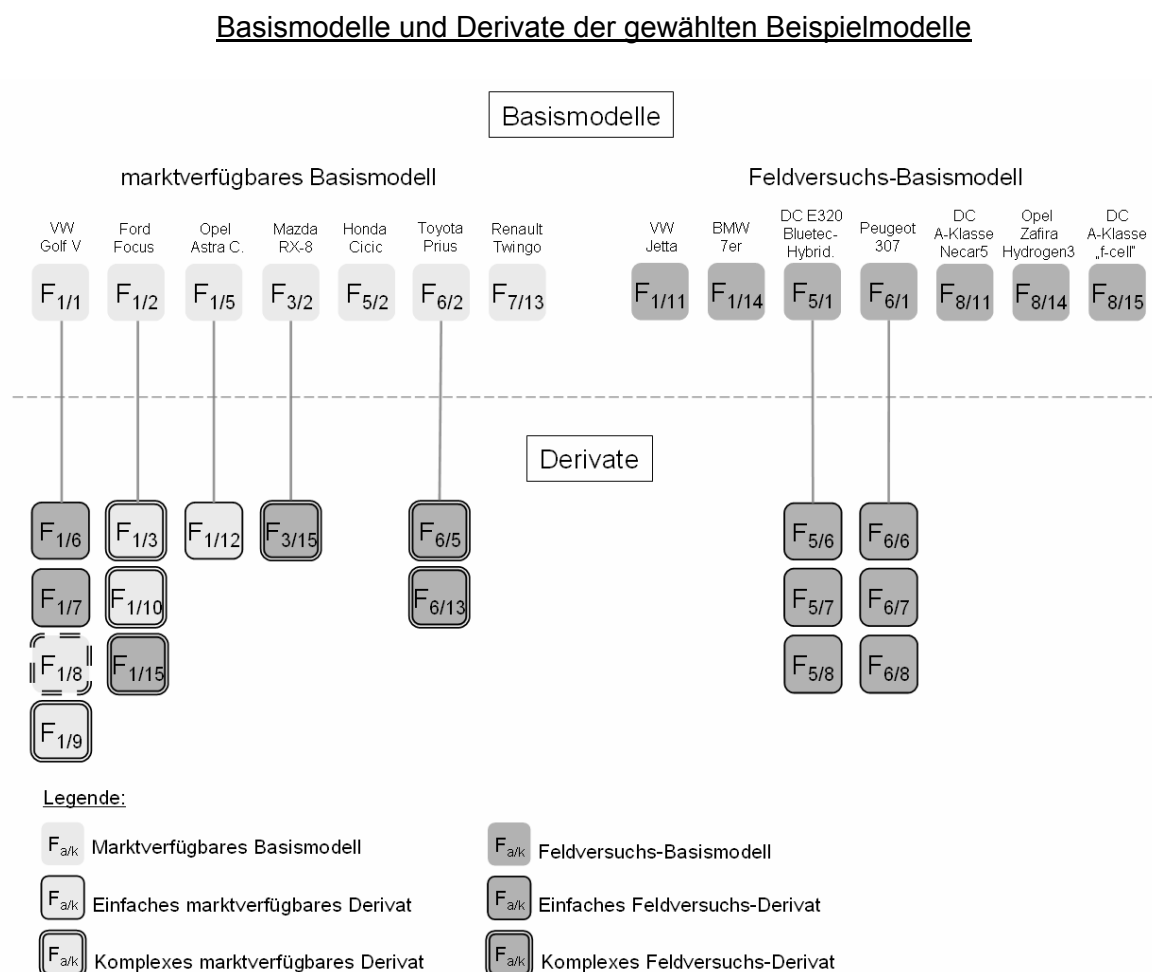


Abbildung 26: Quelle: eigene Darstellung.

Zum Verständnis der Abbildung bedürfen zuerst die Begriffe »Basismodell« und »Derivat« einer genaueren Erklärung. Unter einem Derivat ist eine antriebs- oder kraftstoffseitige »Variante« oder Abwandlung eines Basismodells zu verstehen. Entscheidend für ein Derivat ist, dass es auf der Fahrzeug-Modellreihe des Basismodells aufbaut und aus ihm hervorgeht. Bei den Basismodellen handelt es sich um reale existente marktverfügbare Fahrzeuge oder felderprobte Prototypen. Ein Derivat hingegen muss nicht zwangsweise »realexistent« sein,

sondern kann aufbauend auf dem Basismodell durch plausible Überlegungen konstruiert werden. Der Vorteil der Derivatbildung liegt darin, dass Derivate sehr gut mit ihren Basismodellen vergleichbar sind, da ihnen dieselbe Modellreihe zugrunde liegt.

Konkret bedeutet dies für unsere Evaluierung: Durch die Bildung von Derivaten können über plausible Rückschlüsse auch für Konfiguration, für die noch keine konkreten Praxiserfahrungen vorliegen, Daten ermittelt werden. Außerdem kann so die Anzahl der Beispielfahrzeuge auf 15 Basismodelle reduziert werden. In der Regel liegt jedem einzelnen Basismodell eine unterschiedliche Modellreihe zugrunde. Eine Ausnahme bilden die beiden Brennstoffzellen-Konfiguration $F_{8/11}$ und $F_{8/15}$. Beide basieren zwar auf der A-Klasse von DaimlerChrysler, aber trotzdem kann nicht das eine Fahrzeug aus dem anderen abgeleitet werden.

Neben der Aufteilung in Basismodelle und Derivate, gibt die Abbildung zusätzlich Auskunft über die Marktverfügbarkeit eines Beispielmotors. Helle Felder stellen dabei marktverfügbare Beispielmotoren dar, die dunkleren Felder Feldversuchsfahrzeuge. Als marktverfügbar können in Deutschland folgende Fahrzeug-Konfigurationen angesehen werden: Der Diesel Golf von VW ($F_{1/1}$), der Ford-Focus in der Benzin- und Flüssiggasausführung ($F_{1/2}$ und $F_{1/3}$), der erdgas- bzw. biogasbetriebene Opel Astra Caravan ($F_{1/5}$, $F_{1/12}$) sowie der seit 2006 auch in Deutschland marktverfügbare Ford-Focus Flexifuel. ($F_{1/10}$). Weiter sind ab Werk erhältlich: Der Mazda RX-8 mit Wankelmotor ($F_{3/2}$) sowie die benzinbetriebenen Hybridmodelle ($F_{5/2}$ und $F_{6/2}$).

Außerdem weist die Umrahmung eines Konfigurations-Feldes darauf hin, ob eine Derivatbildung Umrüstmaßnahmen erfordert oder nicht. Sind keine Umrüstmaßnahmen erforderlich, so handelt es sich um ein »einfaches Derivat« und die Felder sind einfach gerahmt. Sind Antriebs- und/oder kraftstoffseitig Umrüstmaßnahmen notwendig, so liegt ein »komplexes Derivat« vor und die Felder sind zweifach gerahmt. Biodiesel-Fahrzeuge ($F_{1/8}$) stellen einen Grenzfall dar und es ist im Einzelfall zu prüfen, ob das Fahrzeug für Biodiesel zugelassen ist oder nicht. Um dies anzudeuten, wurde das Feld $F_{1/8}$ gestrichelt umrandet.

Für bestimmte Beispielmotoren wäre aus Datenerhebungsgesichtspunkten eine Zuordnung als Derivat nicht notwendig gewesen. Bestes Beispiel hierfür sind die LPG- und Ethanol-Ausführung des Ford Focus ($F_{1/3}$ und $F_{1/10}$). Die Fahrzeuge werden »ab Werk« von Ford auf dem deutschen Markt angeboten. Da aber beide Ausführungen auf der Modellreihe des benzinbetriebenen Focus ($F_{1/2}$) basieren, wurden Sie als Derivate betrachtet. Ein drittes Derivat des Focus stellt der wasserstoffbetriebene Ford Focus Cmax ($F_{1/13}$) in der Ausführung als Kompaktvan dar. Bei dem Fahrzeug handelt es sich um einen Prototyp.

Weiter kann der Wasserstoff-Wankelmotor im Mazda Hydrogen RE ($F_{3/15}$) als ein Derivat der marktverfügbaren Benzinvariante des RX-8 ($F_{3/2}$) angesehen werden. Ebenso stellen die Ausführungen des Toyota-Prius als Erdgas-Hybrid ($F_{6/5}$) und Plug-In-Hybrid ($F_{6/13}$) Derivate des bereits am Markt erhältlichen Prius II dar.

Eine Bildung von Derivaten für die Diesel-Ersatzkraftstoffe liegt auf der Hand, da, abgesehen von dem Pflanzenöl-Derivat, keine größeren Umbaumaßnahmen am Basismodell notwendig sind. Der Golf V dient als Basismodell für die Derivate $F_{1/6}$ (GtL), $F_{1/7}$ (BtL), $F_{1/8}$ (Biodiesel) und $F_{1/9}$ (Pflanzenöl). In gleicher Weise können der Bluetec-Hybrid von DaimlerChrysler ($F_{5/1}$) und der Peugeot 307 ($F_{6/1}$) als Dieselhybrid-Basismodelle für die Derivate $F_{5/6}$, $F_{5/7}$, $F_{5/8}$ sowie $F_{6/6}$, $F_{6/7}$ und $F_{6/8}$ angesehen werden. Der Einsatz von Pflanzenöl in Diesel-Hybriden ist allerdings unwahrscheinlich, da sich zu den Mehrkosten der Hybridisierung

noch die Mehrkosten der Umbaumaßnahmen für den Pflanzenölbetrieb hinzu addieren würden. Aus diesem Grund wurden diese Konfiguration nicht evaluiert und keine Pflanzenöl-Derivate für die Diesel-Hybride gebildet.

Abschließend möchten wir darauf hinweisen, dass die vorgenommene Einteilung in Basismodelle und Derivate auf die von uns gewählten Beispielmmodelle maßgeschneidert und nicht einfach zu verallgemeinern ist. Ziel der vorgenommenen Einteilung ist nicht, die in der Innovationsmatrix vorgenommene innovationstypologische Systematisierung von Fahrzeugkonzepten weiter zu vertiefen. Es geht hier vielmehr darum, die Datenherkunft der Beispielmmodelle besser zu verstehen. In der weiteren Diskussion der Evaluations-Bereiche werden wir uns immer wieder auf die Überlegungen in Abbildung 26 beziehen.

4.2.2 Daten

Wie bereits oben erwähnt, erwies sich die Quantifizierung der Evaluations-Matrix als ausnehmend schwierig. Entgegen der ursprünglichen Annahme ließen sich die entsprechenden Kennwerte nicht einfach aus einer oder mehreren Datenbanken zusammenstellen oder durch ausgedehnte Recherchen ermitteln. Es zeigte sich sehr schnell, dass ein guter Teil der Daten durch eigene Überlegungen, Vergleiche und Schätzungen berechnet werden musste. Wie in anderen Mobilitätsstatistiken (Hunsicker/Knie/Lange 2007) existiert auch hier bislang keine solide und belastbare Datengrundlage. Dies ist ein Missstand, der dringendst behoben werden muss. Sowohl öffentliche Diskurse als auch Expertendebatten über antriebs- und kraftstofftechnologische Innovationen setzen eine exakte Evaluation und Bewertung dieser Innovationen voraus. Und ohne hinreichend differenzierte, valide und vergleichbare Daten sind solche Evaluationen und Bewertungen nicht zu leisten.

Vor diesem Hintergrund ist die obige Evaluations-Matrix nicht mehr, allerdings auch nicht weniger als eine Anregung und ein konkreter Schritt zur Ermittlung einer dementsprechenden Datenbasis. Obgleich nach bestem Wissen und Gewissen und in mühsamer Kleinarbeit erstellt, kann das Quantifizierungsniveau der hier vorgestellten Evaluations-Matrix nur als vorläufig und provisorisch betrachtet werden. Präzisierungen, Korrekturen, Ergänzungen und Vereinfachungen sind notwendig und sicher auch möglich. Das vorliegende Paper lädt ausdrücklich dazu ein.

Die Qualität und die Quellen der in der Evaluations-Matrix verwendeten Daten lassen sich stichpunktartig wie folgt beschreiben und zusammenfassen:

Datenqualität

Die Verfügbarkeit und Qualität der Datenermittlung für die einzelnen Beispielmmodelle ist vor allem vom aktuellen Entwicklungsstand der Fahrzeuge abhängig. Für marktetablierte Fahrzeuge gibt es umfangreiche Daten seitens der Automobilhersteller sowie Statistiken verschiedener Ämter. Die Datenverfügbarkeit für Vorserienfahrzeuge und Prototypen ist vergleichsweise schwieriger. Bestenfalls liegen hier für die Fahrzeuge Betriebserfahrungen aus Felderprobungen vor. Auf eine systematische, lückenlose Datenerhebung und Validierung über einen längeren Zeitraum kann dabei selbstverständlich nicht zurückgegriffen werden. Deswegen sind für eine möglichst lückenlose und vollständige Evaluation aller Beispielm-

delle qualitative Aussagen von Experten sowie eigene Überlegungen und Rückschlüsse in die Matrix eingeflossen. Um diese »weichen« Zahlen von den »harten« und mehrfach nachgewiesenen Werten zu unterscheiden, haben wir folgende drei Qualitätsklassen für die einzelnen Daten gebildet:

- Klasse 1: autorisierte Daten. Es handelt sich um belastbare, in der Praxis mehrfach nachgewiesene und allgemein akzeptierte Werte. Ein Beispiel hierfür sind Erhebungen des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA). Das KBA ist eine ergiebige Datenquelle für Beispielmotive mit einer allgemeinen Betriebserlaubnis oder einer EG-Typgenehmigung. Diese Daten weisen ein Höchstmaß an Vergleichbarkeit und Integrität auf.
- Klasse 2: recherchierte Daten. Bei diesen Daten handelt es sich beispielsweise um Aussagen von Herstellern über Betriebserfahrungen von Prototypen in Feldversuchen. Eine zuverlässige Validierung der Daten im mehrjährigen Alltagseinsatz ist hier noch nicht erfolgt.
- Klasse 3: geschätzte Daten. Für einzelne Felder kann mangels ausreichender Datenverfügbarkeit eine Erhebung nur über direkte und indirekte Rückschlüsse erfolgen. Darunter sind zum Beispiel eigene Berechnungen aufgrund plausibler Expertenaussagen zu verstehen.

Datenquellen

Im Folgenden werden die wichtigsten Quellen für die Datenerhebung der marktverfügbaren Beispielmotive behandelt. Die Erhebung der unsicheren Daten für die Feldversuchsfahrzeuge erfolgt getrennt in Kapitel 4.2.3. Ein detaillierter Quellennachweis erfolgt in Form einer »Quellen-Matrix«, welche im Literaturverzeichnis zu finden ist. Durch den analogen Aufbau von Quellen- und Evaluations-Matrix kann so schnell die zu einem Evaluations-Feld gehörige Quelle in der Quellen-Matrix gefunden werden. Die hochgestellten Indizes 1, 2 und 3 geben Auskunft über die Qualitätsklasse der Quelle.

Die Daten für die Datenklasse 1 wurden folgendermaßen erhoben: Für Fahrzeug-Konfigurationen mit allgemeiner Betriebserlaubnis oder EG-Typgenehmigung stellt die 15. Ausgabe, Stand Dezember 2005, der Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsdaten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA 2005) die wesentliche Datengrundlage dar. Ebenfalls als verlässlich ist die Datenbank des europäischen Forschungsprojektes »Cleaner Drive« auf den Internetseiten des Schweizerischen Verbandes für elektrische und effiziente Straßenfahrzeuge e-mobile (e-mobile.ch 2006) anzusehen.

Für Fahrzeuge mit allgemeiner Betriebserlaubnis liefert das KBA uneingeschränktes Datenmaterial für die Evaluations-Parameter mit den Indizes $e = 1$ bis 3, 6, 8 und 12 bis 17. Hierzu sind alle marktverfügbaren Basismotive und -Derivate zu zählen. Gemäß Abbildung 26 sind dies: Die Fahrzeug-Konfigurationen $F_{1/1}$, $F_{1/2}$, $F_{1/3}$ und $F_{1/5}$, also Modelle mit 4-Takt-Hubkolbenmotor ($a=1$) und den Kraftstoffen Diesel ($k=1$), Benzin ($k=2$), Autogas ($k=3$) und Erdgas ($k=5$). Weiterhin gelten die Werte des erdgasbetriebenen Opel Astra ($F_{1/5}$) auch für den Betrieb mit dem nahezu identischen Kraftstoff Biogas ($F_{1/12}$). Auch der seit 2006 in Deutschland erhältliche Ford Focus FFV ($F_{1/10}$) kann als marktverfügbar angesehen werden, allerdings findet das Fahrzeug in der uns vorliegenden Ausgabe der Fahrzeug- und Emis-

sionsdaten des KBA aus dem Jahr 2005 noch keine Berücksichtigung. Daher beruhen die Werte von $F_{1/10}$ auf Herstellerangaben. Der benzinbetriebene Wankelmotor von Mazda ($F_{3/2}$) und die am Markt bereits verfügbaren Otto-Hybridmodelle von Honda ($F_{5/2}$) und Toyota ($F_{6/2}$) sind wiederum durch das KBA erfasst.

Die Cleaner-Drive Datenbank liefert außerdem verlässliche Angaben über den Renault Twingo Elettrica mit Batterie-Elektro-Antrieb ($F_{7/13}$). Allerdings ist das Fahrzeug nur in der Schweiz und Norditalien erhältlich. Die einzelnen über das KBA und e-mobile abgedeckten Felder sind der Quellen-Matrix zu entnehmen.

Aussagekräftige Beispielmotoren und Datenmaterial für die Verbrennung von flüssigem Erdgas LNG ($F_{1/4}$), den Betrieb eines Mildhybriden mit Erdgas ($F_{5/5}$) sowie für den 2-Takt-Dieselmotor ($F_{2/1}$) konnten nicht recherchiert werden.

4.2.3. Evaluationsbereiche

Im Folgenden wird die Datenherkunft der Feldversuchsfahrzeuge und Prototypen vorgestellt. Für diese Fahrzeuge liegen keine durch das KBA legitimierten und objektivierten Angaben vor, sondern hier stellen Herstellerangaben der Datenklasse 2 und eigene Überlegungen und Einschätzungen der Datenklasse 3 die wesentlichen Datenquellen dar. Die Herstellerangaben sind dabei mit einer gewissen Vorsicht zu genießen, da gerade bei Prototypen oftmals angestrebte Zielwerte oder Labor-Messwerte angegeben werden. Für Evaluations-Größen, für die keine Werte recherchiert werden konnten, sind eigene Überlegungen, Rechnungen und Schätzungen zur Generierung von Zahlen eingeflossen. Sie werden in diesem Kapitel dargelegt. Die Beschreibung der Datenherkunft erfolgt dabei entlang der vier Evaluations-Bereiche »Technik«, »Ökologie«, »Ökonomie« und »Ranking«.

Evaluationsbereich Technik

Aus der Vielzahl der möglichen technischen Parameter eines Fahrzeuges haben wir uns für die in den Spalten e=1 bis 7 aufgeführten Evaluations-Größen entschieden. Selbstverständlich sind auch andere Größen denkbar und der Bereich wäre beliebig erweiterbar. In diesem ersten Abschnitt wird die Datenherkunft der nicht durch das KBA abgedeckten technischen Evaluations-Größen dargestellt. Keine KBA-Werte liegen zunächst für alle Feldversuchsfahrzeuge vor. Außerdem erfasst das KBA generell keine Angaben zur Elastizität (e=5), Beschleunigung (e=6) und zum Wirkungsgrad (e=7).

Zuerst zu den Feldversuchsfahrzeugen: Ausgehend von den marktverfügbaren Basismodellen können zunächst die technischen Daten für bestimmte Derivate relativ leicht abgeleitet werden. Aufgrund ähnlicher Heizwerte von Diesel, GtL, BtL, Biodiesel und Pflanzöl wurden die technischen Input-Größen (e=1, 2, 3, 6 und 7) des Diesel-Golfes $F_{1/1}$ gemäß Abbildung 26 auf die Golf-Derivate $F_{1/6}$ (GtL), $F_{1/7}$ (BtL), $F_{1/8}$ (RME) und $F_{1/9}$ (Pflanzöl) übertragen. Ebenso konnten die Werte der Diesel-Hybrid-Basismodelle $F_{5/1}$ (Bluetec Hybrid) und $F_{6/1}$ (Peugeot 307) auf die zugehörigen Dieselhybrid-Derivate übertragen werden.

Bei allen anderen Feldversuchsfahrzeugen und deren Derivaten handelt es sich um Otto-Konfigurationen. Hier können die technischen Parameter der Basismodelle nicht ohne weiteres auf die Derivate übertragen werden, da sich die Heizwerte und Eigenschaften der Otto-Kraftstoffe teilweise signifikant voneinander unterscheiden. Daher ist es notwendig, für diese

Fahrzeuge die technischen Daten einzeln zu recherchieren und eine lückenlose Datenerhebung erweist sich als schwierig. Im Einzelnen handelt es sich dabei um den Methanol- und Wasserstoffbetrieb des 4-Taktermotors ($F_{1/11}$, $F_{1/14}$ und $F_{1/15}$), den Wasserstoff-Wankelmotor im Mazda RX-8 ($F_{3/15}$) sowie um die Brennstoffzellenfahrzeuge $F_{8/11}$, $F_{8/14}$ und $F_{8/15}$. Die zugehörigen Quellen für diese Fahrzeuge sind der Quellenmatrix zu entnehmen und den Datenklasse 2 und 3 zuzuordnen.

Nun zu den von uns gewählten und nicht durch das KBA erfassten Evaluations-Parametern. Das Beschleunigungsverhalten eines Fahrzeugs ($e=4$ und 5) wurde, soweit verfügbar, in Veröffentlichungen der Fahrzeughersteller oder aus Fachzeitschriften recherchiert. Die Daten sind demnach der Qualitätsklasse 2 zuzuordnen. Der Elastizitätswert ($e=5$) gibt die Dauer einer Zwischenbeschleunigung im vierten Gang an. Der Wert ist allerdings nicht einheitlich festgelegt. Es finden sich Angaben von 60 auf 100 km/h oder von 80 auf 120 km/h. Die Elastizitätswerte sind bei den Beispielmotoren meist höher als die Beschleunigungswerte, da die herkömmliche Kombination aus Verbrennungsmotor und Schaltgetriebe ihr beschleunigendes Drehmoment stark drehzahlabhängig entwickelt.

Der Wirkungsgrad (Spalte $e=7$) eines Fahrzeugs wird nur selten von den Herstellern einheitlich angegeben und gehört nicht zu den »üblichen« Angaben zur technischen Charakterisierung eines Fahrzeuges. Dies mag daran liegen, dass in der Wirkungsgraddiskussion schnell Äpfel mit Birnen verglichen werden. Es ist jeweils genau zu prüfen, auf welchen Betriebspunkt (Bestpunkt, Nennbereich, Vollast, Teillast) sich die Aussagen beziehen. Dies erklärt die große Spanne an vermeintlichen Wirkungsgradangaben, die von 15 bis 45% reicht. Entscheidend für einen Vergleich ist daher nicht der Wirkungsgrad in einem »Punkt« sondern der mittlere Wirkungsgrad in einem Fahrzyklus.

Aufgrund dieser angedeuteten Vergleichsproblematik und der mangelnden Datenlage wurden die Wirkungsgradangaben in Spalte $e=7$ von uns berechnet. Die Berechnungsmethodik wird im Folgenden erläutert.

Generell ist unter dem Wirkungsgrad eines technischen Systems das Verhältnis von geleisteter Nutzenenergie zu der aufzuwendenden, dem System zugeführten Energie zu verstehen. In einem Fahrzeug wird die aufzuwendende Gesamtenergie in Form von chemischer Energie durch den Kraftstoff zugeführt, diese kann jedoch immer nur zu einem Teil in mechanische Energie zur Fortbewegung eines Fahrzeugs umgewandelt werden. Der Rest geht als Wärme verloren. Damit kann der Wirkungsgrad eines Fahrzeugs wie folgt definiert werden:

$$\eta = \frac{\text{"Nutzen"}}{\text{"Aufwand"}} = \frac{\text{theoretische notwendige Energie zur Fortbewegung}}{\text{tatsächliche zugeführte Energie über den Kraftstoff}} = \frac{\Delta E_{\text{Nutzen}}}{\Delta E_{\text{Aufwand}}} \quad (1)$$

Der »Nutzen«, also der theoretische Energiebedarf zur Fortbewegung eines Fahrzeugs, lässt sich über strömungsmechanische Gesetzmäßigkeiten ermitteln. Unsere weiteren Überlegungen und Berechnungen beruhen auf einem von Professor Lino Guzzella vorgestelltem Berechnungsverfahren (Guzzella 2003, 12). Das Verfahren ermöglicht die Ermittlung des theoretischen Energiebedarfes eines Fahrzeugs zur Bewältigung des 11,4 km langen Fahrzyklus im NEFZ (Neuer europäischer Fahrzyklus). In die Berechnung fließen über den C_w -Wert und die Querschnittsfläche A der Luftwiderstand sowie die Masse eines Fahrzeugs ein.

Neben diesen konstruktiv bedingten Parametern wird auch die Rollreibung der Reifen berücksichtigt. Teilt man den berechneten Energiebedarf durch die Zykluslänge des NEFZ von 11,4 km, so stellt das Ergebnis den durchschnittlichen Energiebedarf im NEFZ pro Kilometer dar. Damit lautet die Berechnungsgleichung:

$$\Delta E_{\text{Nutzen, pro km}} = \frac{c_w \times A \times 2100 + m \times \mu \times 95 + m \times 1,4}{11,4} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{km}} \right] \quad (2)$$

$\Delta E_{\text{Nutzen, km}}$	Durchschnittlicher Energiebedarf im NEFZ pro km
C_w	Luftwiderstandsbeiwert
A	Fahrzeugquerschnitt
m	Fahrzeugmasse
μ	Rollreibungskoeffizient

Der »Aufwand«, also die tatsächlich benötigte Energie, um ein Fahrzeug zu bewegen, ergibt sich durch Multiplikation der Verbrauchswerte aus Spalte e=8 mit dem zugehörigen volumetrischen Heizwert des jeweiligen Kraftstoffs. Da es sich in Spalte 8 um die Verbrauchswerte pro 100 km handelt, muss das Ergebnis noch durch 100 geteilt werden, um den Verbrauch pro km zu ermitteln. Somit gilt:

$$\Delta E_{\text{Aufwand, pro km}} = \frac{\Delta E_{\text{Aufwand, pro 100km}}}{100} = \frac{V_{\text{Fa/k}} \times H_k}{100} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{km}} \right] \quad (3)$$

$\Delta E_{\text{Aufwand, km}}$	(tatsächlich) aufzuwendende Energie pro km
$V_{\text{Fa/k}}$	Verbrauch einer Fahrzeug-Konfiguration $F_{a/k}$
H_k	Volumetrischer Heizwert des Kraftstoffs k

Nun kann der Wirkungsgrad eines Fahrzeugs nach Gleichung (3) ermittelt werden:

$$\eta = \frac{\Delta E_{\text{Nutzen}}}{\Delta E_{\text{Aufwand}}} = \frac{c_w \times A \times 2100 + m \times \mu \times 95 + m \times 1,4}{V_{\text{Fa/k}} \times H_k} \times \frac{100}{11,4} \quad (4)$$

Bei der Wahl der Beispielm Modelle wurde soweit wie möglich Wert darauf gelegt, möglichst Fahrzeuge der Mittelklasse zu wählen. Eine Recherche aller Luftwiderstandsbeiwerte und Querschnittsflächen für die gewählten Beispielm Modelle würde den Rahmen dieser Untersuchung sprengen, so dass wir uns im Weiteren auf »Durchschnittsangaben« beziehen werden. Nach Guzella liegt das Produkt aus Luftwiderstandsbeiwert und Querschnittsfläche, auch als »Aero-Wert« bezeichnet, für einen Mittelklasse-Pkw bei 0,7m² (Guzella 2003, 13). Als Rollwiderstand wurde ein Reibungskoeffizient von 0,013 gewählt (ebenda). Die Fahrzeugmasse (Spalte e=1) und der Verbrauch (Spalte e=9) sind der Evaluations-Matrix zu entnehmen. Die volumetrischen Heizwerte der Kraftstoffe sind in Abbildung 27 zusammengestellt. Damit können nach Gleichung (4) die Wirkungsgrade der Beispielm Modelle berechnet werden.

Hierzu ein Beispiel: Wir berechnen den Wirkungsgrad des Golf TDI ($F_{1/1}$):

$$\eta = \frac{\Delta E_{\text{Nutzen}}}{\Delta E_{\text{Aufwand}}} = \frac{0,7 \text{ m}^2 \times 2100 + 1360 \text{ kg} \times 0,013 \times 95 + 1360 \text{ kg} \times 1,4}{51 \times 35600 \frac{\text{kJ}}{\text{l}}} \times \frac{100}{11,4} = 0,25$$

Ein Wirkungsgrad von 25% im NEFZ ist für einen Diesel-Golf plausibel und zeigt, dass das Rechenverfahren und die getroffenen Annahmen ausreichend genau sind. Für den mit Flüssigwasserstoff betriebenen Hydrogen3 (F_{8/14}) geben Wissenschaftler von Opel einen Tank-to-Wheel-Wirkungsgrad von 36% im NEFZ an (Helmolt von/Eberle 2007, 835). Unsere Berechnung liefert einen Wert von 35%.

Bei schweren Fahrzeugen der Oberklasse, z.B. den 7er von BMW oder den Bleutec-Hybrid von Daimler, stößt das Verfahren jedoch an seine Grenzen und die Ergebnisse werden ungenauer, da der Aero-Wert und der Rollwiderstand sich auf Mittelklassewagen beziehen.

Für die druckwasserstoffbetriebene Brennstoffzellen A-Klasse (F_{8/15}) sowie für den druckwasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor im Ford Focus C-max (F_{1/15}) konnte die Fahrzeugmasse nicht recherchiert und damit der Wirkungsgrad nicht berechnet werden. Angaben von DaimlerChrysler zur Folge, liegt der Wert bei 37% (Wüchner 2003). Ausgehend von diesem Wert wurde der Wirkungsgrad für den ebenfalls auf der A-Klasse basierenden NECAR V (F_{8/13}) abgeleitet. Für die Methanolreformierung wurde dabei eine Effizienz von 80% (Lamm 2002, 6) angenommen. Für den H2-Focus sind uns keine Angaben bekannt.

Evaluationsbereich Ökonomie

Die Spalten e=8 bis 11 stellen die ökonomischen Evaluationsgrößen dar. Die Parameter e=8 und 9 erfassen dabei den Kraftstoffverbrauch, e=10 die spezifischen Kraftstoffkosten pro 100 km und e=11 die Anschaffungskosten. Auch dieser Evaluationsbereich hat nicht den Anspruch, alle denkbaren Ökonomiedaten eines Fahrzeugs zu erfassen und ist damit ebenso wie die anderen Bereiche ausbaufähig.

Für die Erhebung der Ökonomie-Daten sind an verschiedenen Stellen Berechnungen notwendig, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Vorbereitend hierfür werden physikalische Stoffwerte für die einzelnen Kraftstoffe in einer Umrechnungstabelle zusammengestellt. Abbildung 27 zeigt die in Deutschland gebräuchlichen Kennwerte der gewählten Kraftstoffe k=1 bis 15. Der Index weist auf die zu einem Wert gehörige Quelle hin.

Kraftstoff-Umrechnungstabelle

Brennstoff (k)		Vol. Heizwert [MJ/l]	Grav. Heizwert [MJ/kg]	Dichte [kg/m ³]	Preis [Ct/l], [Ct/kwh],
		H _v	H _m	ρ	
1	Diesel	35,6 ¹⁾	42,9 ¹⁾	830 ¹⁾	114,4 ²⁾
2	Benzin	31,0 ¹⁾	41,6 ¹⁾	745 ¹⁾	133,1 ²⁾
3	Autogas LPG	24,9	46,3 ³⁾	538 ⁴⁾	63,2 ⁵⁾
4	Erdgas LNG	--	--	--	--
5	Erdgas CNG	0,038 ⁶⁾	48,1	0,79 ⁷⁾	0,051 ⁸⁾
6	GTL	34,1 ⁹⁾	43,7	780 ⁹⁾	□
7	BTL	33,8 ⁹⁾	43,9	770 ⁹⁾	70 ¹⁰⁾ , *
8	Biodiesel RME	33 ¹¹⁾	37 ¹¹⁾	892	103,4 ¹²⁾
9	Pflanzenöl Pöl	34 ¹¹⁾	37 ¹¹⁾	919	79 ¹³⁾
10a	Ethanol E100	21,3	26,8 ¹⁴⁾	794 ¹⁵⁾	84,8
10b	E-85	22,7 ¹⁶⁾	29,1	780 ¹⁶⁾	92 ¹⁶⁾
11	Methanol M100	15,8	20 ¹⁵⁾	792 ¹⁵⁾	32 ¹⁵⁾ , *
12	Biogas	0,038 ⁶⁾	48,1	0,79 ⁷⁾	0,051 ¹⁷⁾
13	Strom	--	--	--	20 ¹⁴⁾ ; Ct/kwh
14	Wasserstoff LH2	8,5	119,9 ¹⁸⁾	70,8 ¹⁹⁾	50 ²⁰⁾
15	Wasserstoff CGH2	0,0102	119,9 ¹⁸⁾	0,085 ¹⁸⁾	0,06

-- Angabe nicht weiter von Bedeutung, * projizierte Herstellkosten

Abbildung 27, Quelle: eigene Darstellung

¹⁾ Aral-Forschung 2007, ²⁾MWV 2006b, ³⁾Geitmann 2005, ⁴⁾eur-lex 1999, ⁵⁾Schwind, ^{6,7)}Umbach 2006, ⁸⁾Energieportal24 2006a, ⁹⁾VW 2006a, ¹⁰⁾VW 2005, 8, ¹¹⁾Pöl-Tec 2006, ¹²⁾IWR 2006, ¹³⁾C.A.R.M.E.N. 2007, ¹⁴⁾BdE e.V. 2006, 3; ¹⁵⁾Bandi, Specht 2004, 16, ¹⁶⁾C.A.R.M.E.N. 2006, ¹⁷⁾DeTeFleetServices 2006, ¹⁸⁾Gieck 1995, ¹⁹⁾SFK 2002, ²⁰⁾Energieportal24 2006b

Zum Verständnis der Tabelle sind zunächst einige allgemeine Anmerkungen notwendig. Zuerst der Hinweis, dass die Stoffwerte der gasförmigen Brennstoffe (k=4,12 und 14) in der Literatur entweder unter Normalbedingungen (0°C und 1,013 bar) oder bei Standardbedingungen (25°C) angegeben sind. Für unsere Betrachtungen ist jedoch eine andere Temperatur, und zwar eine Bezugstemperatur von 15°C hilfreich, da sich die durch das KBA erfassten Verbrauchsangaben gemäß Richtlinie 1999/100/EG (eur-lex 1999) auf diesen Wert beziehen. Daher wurden die Literaturwerte anhand der idealen Gasgleichung $\rho = p / (R_s \cdot T)$ auf 15°C umgerechnet. Die ideale Gasgleichung setzt die Zustandsgrößen Dichte ρ , Druck p und Temperatur T eines Gases miteinander in Beziehung. R_s ist die für das Gas charakteristische spezifische Gaskonstante.

Zwischen den Heizwerten und der Dichte eines Kraftstoffes bestehen die Beziehungen (5a) und (5b). Die Angaben ohne Quellenachweis in Abbildung 27 wurden anhand dieser beiden Formeln berechnet. Der volumetrische Heizwert H_v stellt dabei den Energiegehalt eines Kraftstoffs pro Liter dar, der gravimetrische oder massenbezogene Heizwert H_m die Energie pro Kilogramm.

$$H_v = \frac{H_m \times \rho}{1000} \quad [\text{MJ/Liter}] \quad (5a)$$

$$H_m = \frac{H_v \times 1000}{\rho} \quad [\text{MJ/kg}] \quad (5b)$$

H_v volumetrischer Heizwert

H_m gravimetrischer Heizwert

Wir betrachten nun zuerst die Verbrauchswerte in der Spalte e=9. Die Werte stellen den Kraftstoffverbrauch der einzelnen Beispielmotoren in Liter pro 100 km dar. Für die Beispielmotoren mit allgemeiner Typzulassung nach Richtlinie 80/1268/EWG werden die Werte des KBA zugrunde gelegt. Es handelt sich demnach um Daten der Klasse 1.

Die Datenerhebung für die nicht durch das KBA erfassten Fahrzeuge erfolgte aus verschiedenen Veröffentlichungen, welche sich wiederum auf Herstellerangaben stützen. Die Angaben sind allesamt der Datenklasse 2 zuzuordnen und jeweils den einzelnen Quellen der Quellen-Matrix zu entnehmen. Der Verbrauch der Batterie-Elektro-Fahrzeuge ($F_{7/13}$) und der Plug-In-Hybride ($F_{6/13}$) spielt insofern eine Sonderrolle, da der Kraftstoff Strom kein vergleichbares Volumen besitzt und in Kilowattstunden (kWh) angegeben wird.

Der Verbrauch von gasförmigen Brennstoffen wird handelsüblich in Kubikmeter oder Kilogramm erfasst. Zur Vereinheitlichung wurden diese Werte in der Spalte e=8 sämtlich in Liter angegeben. Kilogramm-Angaben wurden über die in Abbildung 27 aufgeführten Kraftstoffdichten nach folgender Gleichung (6) in Liter umgerechnet. Hierzu ein Beispiel: Der erdgasbetriebene Vollhybrid Prius CNG ($F_{6/5}$) verbraucht $m=3,4$ kg Erdgas (e-mobile 2006b). Der Verbrauch in Liter beträgt:

$$V_{F_{6/5}} = \frac{m}{\rho} = \frac{3,4 \text{ kg}}{0,790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 4,304 \text{ m}^3 = 4304 \text{ Liter} \quad (6)$$

$V_{Fa/k}$ Verbrauch einer Fahrzeug-Konfiguration (hier 6/5)

m Gewicht des Kraftstoffs

ρ Kraftstoffdichte

Dieser utopisch hoch anmutende Verbrauch ergibt sich aus der geringen Dichte des gasförmigen Kraftstoffes im Normzustand. Daher muss er im Tank stark komprimiert werden, so zum Beispiel auf über 200 bar bei CNG-Erdgasfahrzeugen.

Für den Fall, dass keine expliziten Verbrauchsdaten $V_{Fa/k}$ für ein Derivat eines Basismodells $F_{a/k}$ vorliegen, können diese berechnet werden, wenn der Heizwert H_k des Kraftstoffs k sowie der Verbrauch des Basismodells bekannt sind. Über einen Dreisatz kann der unbekannte Verbrauch $V_{Fa/k}$ nach Gleichung (7) ermittelt werden. Denn es gilt:

$$V_{Fa/k} = V \times \frac{H}{H_k} [\text{Liter}] \quad (7)$$

$V_{a/k}$ gesuchter Verbrauch des Derivats einer Basismodells

H_k bekannter volumetrischer Heizwert des Kraftstoffs k des Derivats

H bekannter Heizwert des Kraftstoffs des Basismodells

V bekannter Verbrauch des Basismodells

Hierzu ein Beispiel: Der Verbrauch eines mit GtL betriebenen Diesel-Golfs ($F_{1/6}$) soll berechnet werden. Bei dem Fahrzeug handelt es sich um ein Derivat des normalen Diesel-Golfs $F_{1/1}$. Für diesen ist der Verbrauch bekannt und außerdem entsprechend Abbildung 27 auch die beiden Heizwerte für Diesel und GtL. Aus Gleichung (7) ergibt sich ein GtL-Verbrauch von:

$$V_{F1/6} = V_{F1/1} \times \frac{H_{k=1}}{H_{k=6}} = 5,0 \text{ l} \times \frac{35,6 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}}{34,1 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}} = 5,2 \text{ l} \quad (8)$$

Der leichte Anstieg des Verbrauchs um ca. 4% hängt mit der geringeren Dichte von GtL zusammen. Trotz des größeren massenspezifischen Heizwerts von GtL kann in einem Liter weniger Energie gespeichert werden als bei Diesel. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Forscher von DaimlerChrysler. Messungen an einem für GtL angepassten Dieselmotor ergaben einen volumetrischen Mehrverbrauch von 5% über demjenigen des Serienfahrzeugs (DaimlerChrysler 2006). Ebenso wie für GtL wurden auch die Verbrauchswerte der anderen Dieselsatzkraftstoffe (k=7, 8, 9) ermittelt und in die Matrix eingetragen.

Bei der Berechnung des Verbrauchswertes für den Ford Focus FFV ($F_{1/10}$) im Ethanolbetrieb (E-85) ist zu beachten, dass 15% des Ethanol-Kraftstoffgemisches Benzin darstellt. Als Basismodell dient hier der Ford Focus im normalen Benzinbetrieb mit einem Verbrauch von 7,0 l/km. Daraus ergibt sich folgende Rechnung:

$$V_{F1/10} = 0,15 \times V_{F1/2} + 0,85 \times V_{F1/2} \frac{H_{k=1}}{H_{k=10}} = 0,15 \times 7,0 \text{ l} + 0,85 \times 7,0 \text{ l} \times \frac{31,0 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}}{21,3 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}} = 9,7 \text{ l} \quad (9)$$

Als nächstes betrachten wir die benzinäquivalenten Verbrauchswerte in der Spalte e=9. Sofern keine Angaben für das Benzinäquivalent eines Beispielmodells vorliegen, können diese aus den Verbrauchswerten der Spalte e=8 berechnet werden. Hierfür wird der Verbrauch eines Beispielmodells $V_{Fa/k}$ aus Spalte e=8 mit dem volumetrischen Heizwert H_k des Kraftstoffs multipliziert und durch den Heizwert von Superbenzin ROZ 95 ($H_{k=2}$) nach DIN EN 228 für Ottokraftstoffe geteilt.

$$V_{Fa/k}^{\text{Benzin äq.}} = V_{Fa/k} \times \frac{H_k}{H_{k=2}} \quad [\text{Liter}] \quad (10)$$

$V_{Fa/k}^{\text{Benzin äq.}}$ gesuchter Verbrauch eine Fahrzeug-Konfiguration $F_{a/k}$ als Benzinäquivalent
 $H_{k=2}$ bekannter Heizwert von Benzin
 $V_{Fa/k}$ bekannter Verbrauch des Beispielmodells (in Liter aus Spalte e=8)
 H_k bekannter Heizwert des Kraftstoff k der Fahrzeug-Konfiguration $F_{a/k}$

Als Beispiel wird anhand Gleichung (10) das Benzinäquivalent des erdgasbetriebenen Prius ($F_{6/5}$) berechnet:

$$V_{F6/5}^{\text{Benzin äq.}} = V_{F6/5} \times \frac{H_{k=5}}{H_{k=2}} = 4539 \text{ l} \times \frac{0,038 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}}{31,0 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}} = 5,3 \text{ l} \quad (11)$$

Es lässt sich nach Gleichung (6) auch für den strombetriebenen Renault Twingo ($F_{7/13}$) ein Benzinäquivalent errechnen. Hierfür wird der Verbrauch von 15 kWh in Megajoule umgerechnet (1Joule=1Ws) und wiederum durch den volumetrischen Heizwert von Benzin geteilt:

$$V_{F_{7/13}}^{\text{Benzin äq.}} = \frac{0,015 \text{ MWh} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{31,0 \frac{\text{MJ}}{\text{l}}} = 1,71 \quad (12)$$

Ebenso wurden die Verbrauchsäquivalente für die anderen Beispielmodelle errechnet.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass unsere Untersuchungen jeweils die Wandlungseffizienz vom Tank aufs Rad betrachten und die Vorketten unberücksichtigt lassen. Bei der Ladung der Batterie ist natürlich genau zu prüfen, woher der Strom stammt. Handelt es sich beispielsweise um konventionellen Strom aus fossilen Kraftwerken, so wird üblicherweise davon ausgegangen, dass der primärenergetische Aufwand dreimal höher als der Verbrauch des Fahrzeugs ist.

Nun zu den Verbrauchskosten in der Spalte e=10. Sie stellen einen wichtigen Anhaltspunkt für die voraussichtlichen Betriebskosten eines Beispielfahrzeuges dar und ergeben sich durch Multiplikation des in Litern angegebenen Verbrauchswertes aus der Spalte e=8 mit dem Literpreis des verwendeten Kraftstoffes k aus Abbildung 27. Einzige Ausnahme bilden die beiden »stromtankenden« Konfiguration $F_{6/13}$ (Plug-In-Hybrid) und $F_{7/13}$ (Batterie-Fahrzeug). Dort errechnen sich die Kraftstoffkosten durch Multiplikation des in Kilowattstunden angegebenen Verbrauchswerts aus Spalte e=8 mit einem angenommen durchschnittlichen Strompreis von 20 Cent für die Kilowattstunde (BdE 2006). Bei den Angaben in der Tabelle handelt es sich größtenteils um Verkaufspreise. Lediglich die Werte für Methanol, BtL und GtL stellen projizierte Herstellungskosten dar.

In der Spalte Neupreise (e=11) sind drei Preisarten zu unterscheiden: Erstens, der Verkaufspreis für handelsübliche Neuwagen. Zweitens, der modifizierte Verkaufspreis durch Umrüstmaßnahmen zur Anpassung an alternative Kraftstoffe und drittens die derzeitigen Herstellkosten oder projizierten Verkaufspreise für noch nicht serienreife Feldversuchsfahrzeuge und Prototypen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass ein Preisvergleich oder gar ein Preisranking der Beispielmodelle nicht angemessen ist und irreführend wäre. Denn die zu erwartende Verkaufspreise hängen im wesentlichen von den produzierten Stückzahlen ab, daher würde es keinen Sinn machen, den Preis von Fahrzeugen in Serienproduktion mit einer Produktion in Kleinserie oder gar den Herstellungskosten eines Prototypen zu vergleichen. Fast alle technologischen Errungenschaften der letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass die Kostenentwicklung dem Erfahrungsgesetz nach Henderson folgt: Mit jeder Verdopplung der im Zeitablauf kumulierten Produktionsmenge fallen die realen Stückkosten um 20% bis 30% (ISI 2002,17). Daher sind bei Mehrkosten-Angaben stets die produzierten Einheiten zu hinterfragen. Unter der Annahme, dass für eine von der Konvention abweichende antriebs- oder kraftstoffseitige Innovation alle Komponenten und Baugruppen des Fahrzeugs marktverfügbar sind und die Innovation dieselbe Diffusion erlangt wie der konventionelle Verbrennungsmotor, werden Skalierungseffekte zum Tragen kommen und es sind keine höheren Stückkosten zu erwarten. Abhängig von den zukünftigen notwendigen ökologischen Optimierungsmaßnahmen des Verbrennungsmotors im Bereich der Abgasrei-

nigung und Effizienzsteigerung, können in Masse produzierte alternative Fahrzeugkonzepte zukünftig sogar nicht nur die ökologischere, sondern auch die wirtschaftlichere Alternative darstellen.

Die Preisangaben in der Matrix beruhen im Wesentlichen auf Angaben der Hersteller sowie auf der im Auftrag der europäischen Union erstellten Studie „Well-to-Wheel Analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context“ (EUCAR 2007). Die Studie berücksichtigt Skalierungseffekte ansatzweise und geht von Stückzahlen größer 50.000 Einheiten (ebenda, 2) aus.

Zunächst zu Herstellerangaben. Für die in Abbildung 26 durch die hellen Felder als marktverfügbar gekennzeichneten Beispielmotoren konnten die Verkaufspreise direkt aus den Prospekten der Hersteller und aus deren Preislisten entnommen werden. Da der Betrieb eines Dieselmotors mit GtL ($k=6$) und BtL ($k=7$) keine bzw. mit RME ($k=8$) geringfügige, Umbaumaßnahmen erfordert, wurde der Wert der Golf Basis-Konfiguration $F_{1/1}$ auf die Golf-Derivate $F_{1/6}$, $F_{1/7}$ und $F_{1/8}$ übertragen. Selbige Überlegung gilt auch für die Übertragung der Werte der beiden Dieselhybrid-Basismotoren $F_{5/1}$ und $F_{6/1}$ auf deren Derivate. Allerdings sind Diesel-Hybride noch nicht marktverfügbar und zukünftige Verkaufspreise daher noch ungewiss. PSA Peugeot plant einen Serienstart erst ab 2010 (auto-reporter 2007). Bis dahin sollen die Mehrkosten von derzeit bis zu 6.000 auf 1.500 Euro pro Fahrzeug reduziert sein (ebenda). Unsere Kostenschätzung basiert auf den derzeitigen Mehrkosten von 6.000 Euro, welche auf den Verkaufspreis des normalen Dieselmotors von Peugeot zugeschlagen wurden.

Für LPG, Pflanzenöl und Methanol wurden die anfallenden Mehrkosten für eine Umrüstung recherchiert und zum Neupreis des jeweiligen Basismotors hinzu gerechnet. Der Umbau des Diesel Golf V ($F_{1/1}$) auf Pflanzenölbetrieb ($F_{1/9}$) liegt bei 3.880 Euro (VWP 2006). Für den bivalenten Betrieb eines Fahrzeugs mit Autogas ($F_{1/3}$) ist mit einem Aufschlag von 2.400 EUR zu rechnen (ADAC 2007b). Nach Angaben des Methanol Instituts belaufen sich die Kosten für den Methanolumbau des VW-Jetta auf 150 US\$ (MI 2005). Durch eine Verbreitung der genannten Umrüstmaßnahmen ist eine deutliche Kostenreduktion zu erwarten.

Fahrzeuge mit Wasserstoffmotoren und Brennstoffzellenantrieben befinden sich noch in der Erprobung und Angaben bezüglich zukünftiger Verkaufspreise werden von den Herstellern selten gemacht. Daher wurde für die Preisangaben der Konfigurationen $F_{1/14}$ (BMW Hydrogen 7), $F_{1/15}$ (Ford Focus Cmax), $F_{8/14}$ (Opel Hydrogen 3) und $F_{8/15}$ (DC f-cell) auf die Kostenschätzungen der genannten Studie (EUCAR 2007) zurückgegriffen. Die Studie gibt Mehrkosten für verschiedene alternative Fahrzeugkonzepte in Bezug auf ein Referenzmodell an. Bei dem Referenzmodell handelt es sich um ein Fahrzeug mit direkteinspritzendem Ottomotor mit einem Verkaufspreis von 19.540 EUR (ebenda, 5). Wir gehen im Weiteren von 20.000 EUR aus. Entsprechend der Studie wird der Verkaufspreis für ein Fahrzeug mit Wasserstoffmotor und 700 bar-Druckspeichertechnik 24,3% (ebenda, 6), also etwa 25%, über dem Referenzmodell liegen. Die Mehrkosten für die Ausführung mit Flüssigwasserstoffspeicher sind vergleichbar. Für hybridisierte Brennstoffzellenfahrzeuge mit 700 bar Wasserstoffspeicher und Li-Ionen-Batterien werden Mehrkosten von etwa 76% (ebenda, 7) angegeben. Ohne die Hybridisierung liegen die Mehrkosten bei etwa 60% (ebenda, 7). Die Angaben gelten auch für die Ausführung mit Flüssigwasserstofftanks. Damit berechnen sich die Mehrkosten wie folgt (Werte gerundet): 5.000 EUR für die Wasserstoff-Motoren ($F_{1/14}$ und $F_{1/15}$)

und je nach Hybridisierungsgrad und Batterietechnologie 12.000 bis 15.000 EUR für die Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit Wasserstoffspeicher ($F_{8/14}$ und $F_{8/15}$). Wir gehen im weiteren von 13.000 EUR aus. Diese anhand der EUCAR-Studie ermittelten Mehrkosten wurden auf die entsprechenden „Otto-Modelle“ mit Benzinbetrieb aufgeschlagen. Die Werte sind den entsprechenden Feldern der Evaluations-Matrix zu entnehmen.

Für Brennstoffzellenfahrzeuge mit Methanolreformer wurde nicht auf die Angaben der EUCAR-Studie zurückgegriffen, sondern sie basieren auf Angaben des Herstellers NuCell-Sys und des Forschungsinstituts ZSW (Tillmetz/Benz 2006). In einem methanolbetriebenen Brennstoffzellen-Pkw entfallen die Kosten für die Wasserstoffspeicherung, da der Wasserstoff mittels eines On-Board Reformers aus Methanol direkt im Fahrzeug gewonnen wird. Im Gegenzug fallen dafür Mehrkosten für den Methanolreformer an, welche allerdings in einer ähnlichen Größenordnung wie die des Wasserstoffspeichers liegen. Im NECAR V liegen die Kosten für den Methanolreformer bei 3.550 US\$ (2.642 EUR) bei einer Produktionsmenge von 10.000 Einheiten und fallen auf einen Wert von 1.750 US\$ (1.302 EUR) bei 100.000 produzierten Einheiten (Tillmetz/Benz 2006, 12). 700bar Wasserstofftanks in einem nicht-hybridisierten Brennstoffzellenfahrzeug werden mit 2.700 EUR (EUCAR 2007, 7) angesetzt. Daher ist davon auszugehen, dass methanolbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge nicht teurer sind als wasserstoffbetriebene.

Bei der Angabe für den wasserstoffbetriebenen Mazda mit Wankelmotor ($F_{3/15}$) handelt es sich um eine monatliche Leasingrate.

Abschließend sei daran erinnert, dass jegliche projizierten Preise und Aufschläge der Datenklasse 3 zuzuordnen sind, da sie auf Annahmen, Überlegungen und Prognosen beruhen, welche sich nicht ausreichend validieren lassen. Außerdem ist eine Vergleichbarkeit der Daten aufgrund unterschiedlicher Produktionsmenge nur sehr bedingt möglich.

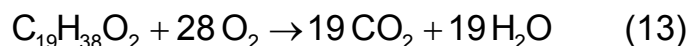
Evaluationsbereich Ökologie

Die ökologischen Evaluationsparameter sind in den Spalten e=12 bis 17 erfasst. Dabei umfassen die Spalten 13 bis 16 die in der Euro-Abgasnorm geregelten Emissionswerte der Schadstoffe Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NOx) und Rußpartikel (PM). Der Kohlendioxidausstoß ist der Spalte e=12 zu entnehmen und die Spalte e=17 gibt Auskunft über die Geräuschemissionen der Fahrzeuge. Auch dieser Evaluationsbereich kann jederzeit um weitere ökologische Größen erweitert werden.

Wir betrachten zuerst die CO₂-Emissionen der Beispielmotive in der Spalte e=12. Für die in Deutschland zugelassenen Modelle werden die CO₂-Emissionen durch das KBA erfasst. Ebenso liegen Werte für die mit synthetischem Diesel betriebenen Derivate der Diesel-Basismotive $F_{1/1}$, $F_{5/1}$ und $F_{6/1}$ vor, denn der CO₂-Ausstoß von GtL und BtL ist mit herkömmlichen Kraftstoffen vergleichbar (ASFE 2006, 6; Rabe 2004).

Für den Fall, dass für eine Konfiguration $F_{a/k}$ keine Angaben durch das KBA oder aus anderen Quellen vorliegen, kann der CO₂-Ausstoß auch aus dem Kohlenstoffgehalt des Kraftstoffs k und dem Verbrauchswert der Konfiguration aus der Spalte e=9 berechnet werden. Für RME (k=8), Pflanzenöl (k=9), Ethanol (k=10) sowie für Methanol (k=11) wurden die CO₂-Emissionen der Beispielmotive errechnet. Die Rechnung wird beispielhaft für RME (k=8) mit der chemischen Strukturformel $C_{12}H_{38}O_2$ vorgestellt:

Bei einer vollständigen Verbrennung verbrennt Biodiesel (RME) nach folgender chemischen Gleichung:



Die Molmasse vom RME beträgt $M_{\text{RME}}=298\text{g}$. Damit kann die Anzahl der Mole in einem Kilogramm RME berechnet werden:

$$n_{\text{RME}} = \frac{m_{\text{RME}}}{M_{\text{RME}}} = \frac{1\text{kg}_{\text{RME}}}{298 \frac{\text{g}_{\text{RME}}}{\text{mol}_{\text{RME}}}} = 3,36 \text{ mol}_{\text{RME}} \quad (14)$$

Aufgrund der Stöchiometrie in Gleichung (14) kommen auf ein RME-Molekül 19 CO_2 -Moleküle. Wenn nun bei der Verbrennung von 1 kg RME 3,36 Mole notwendig sind, so müssen 19 Mal mehr Mole CO_2 als Edukte bei der Verbrennung entstehen:

$$n_{\text{CO}_2} = 19 \times n_{\text{RME}} = 19 \times 3,36 \text{ mol}_{\text{CO}_2} = 63,76 \text{ mol}_{\text{CO}_2} \quad (15)$$

Über die Molmasse von CO_2 kann dieser Wert in Kilogramm umgerechnet werden:

$$m_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} \times M_{\text{CO}_2} = 63,76 \text{ mol}_{\text{CO}_2} \times 44 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{mol}_{\text{CO}_2}} = 2,81 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \quad (16)$$

Das bedeutet: Pro Kilogramm RME werden 2,81 kg CO_2 ausgestoßen.

Um die emittierte Kohlendioxidmenge in Kilogramm CO_2 pro Liter RME zu berechnen, wird zuerst die Kraftstoffmasse von 1kg RME durch die Dichte von RME geteilt:

$$V_{\text{RME}} = \frac{m_{\text{RME}}}{\rho_{\text{RME}}} = \frac{1\text{kg}}{0,892 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 1,12 \text{ Liter} \quad (17)$$

Und daraus folgt:

$$\frac{m_{\text{CO}_2}}{V_{\text{RME}}} = \frac{2,81 \text{ kg}_{\text{CO}_2}}{1,12 \text{ l}_{\text{RME}}} = 2,5 \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2}}{\text{l}_{\text{RME}}} \quad (18)$$

Durch Multiplikation mit dem Verbrauchswert auf 100 km (Spalte e=9) ergibt sich schließlich der CO_2 -Ausstoß pro km wie folgt:

$$V_{\text{RME}} = 2500 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{l}_{\text{RME}}} \times \frac{5,3 \text{ l}_{\text{RME}}}{100 \text{ km}} = 133 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{km}} \quad (19)$$

Auf gleiche Art und Weise wurde der CO_2 -Ausstoß für den Pflanzenölbetrieb des Golf V ($F_{1/9}$), für den E85-Betrieb des Ford Focus FFV ($F_{1/10}$) sowie für den Methanolbetrieb des

VW-Jetta ($F_{1/10}$) berechnet. Die einzelnen Berechnungen werden in der Diplomarbeit von Krien (Krien 2007, 111-116) durchgeführt.

Wasserstoff ($k=13,14$) enthält keinen Kohlenstoff und somit entstehen keine kraftstoffbedingten Kohlenwasserstoffverbindungen bei seiner Verbrennung in Motoren jeder Art. Dass BMW 5 g/km CO_2 angibt, ist auf im Kolben mit verbranntes Motorenöl und die Spülung des Aktivkohlefilters zurückzuführen, der verdunstetes Benzin zurückhält. Die BMW-Angabe wurde auch für den druckwasserstoffbetriebe Ford Focus Cmax übernommen.

Nun behandeln wir die in der Euro-Norm gesetzlich geregelten Schadstoffe der Spalten $e=12$ bis 16. Eine systematische Erfassung durch das KBA ist nur für die Beispielmotoren mit allgemeiner Typenzulassung und bei Betrieb mit »handelsüblichen« Kraftstoffen gegeben. Als handelsüblich, sprich an der Tankstelle verfügbar, kann neben Benzin und Diesel, Autogas ($k=3$), Erdgas CNG ($k=4$), Bio-Diesel RME ($k=8$) inzwischen auch Ethanol ($k=11$) bezeichnet werden. Unser Augenmerk gilt daher der Erfassung der Emissionswerte der Beispielmotoren bei einem Betrieb mit nicht-handelsüblichen Kraftstoffarten. Eine systematische Abgasanalyse unter realen Alltagsbedingungen liegt für diese Kraftstoffe allerdings selten vor und der Einfluss ist oftmals nur in Studien und Vorträgen in prozentualen Auf- und Abschlägen gegenüber einem Referenzkraftstoff angegeben. Die Werte sind daher den Klassen 2 und 3 zuzuordnen. Wiederum ist die Datenherkunft der Quellen-Matrix zu entnehmen.

Vorweg noch eine Anmerkung zu den Partikelemissionen eines Fahrzeugs: Die Rußbildung stellt bei Ottomotoren kein nennenswertes Problem dar und der Wert liegt um den Faktor 20 bis 200 (kfztech 2007) niedriger als bei Dieselfahrzeugen. Es ist daher davon auszugehen, dass die Partikelwerte der Beispielmotoren unter 5 mg/km liegen und entsprechend ist auch die Angabe „<5“ in den zugehörigen Feldern zu verstehen. Auch Dieselmotoren müssen mit Inkrafttreten von Euro 5 diesen Wert erreichen, was nur durch Einbau eines Partikelfilters möglich sein wird. Der von uns gewählte Diesel-Golf V ($F_{1/1}$) mit 77 kW ist allerdings noch nicht mit Diesel-Partikelfilter serienmäßig verfügbar. Die Leistungsklasse mit 103 kW hingegen ist bereits mit Filter ausgestattet. Dadurch sind die Partikelemissionen um den Faktor 10 niedriger. Allerdings verdreifachen sich die CO-Werte und die Lärmemissionen steigen geringfügig an (KBA 2005). Sowohl bei Otto- als auch bei Dieselmotor ist allerdings die gesundheitliche Auswirkung von so genanntem Feinstaub, darunter sind Partikel im Nanometerbereich zu verstehen, noch ungeklärt. Näheres zu Partikeln und deren Auswirkung folgt in Kapitel 5.3.

Nun betrachten wir das Emissionsverhalten der einzelnen Kraftstoffe und beginnen dabei mit den synthetischen Kraftstoffen. Die beiden folgenden Abbildungen 28 und 29 zeigen das Potenzial zur Emissionsreduktion durch den Einsatz von GtL ($k=6$) und BtL ($k=7$) gegenüber Diesel.

Schadstoffemissionen GtL im Vergleich zu Diesel

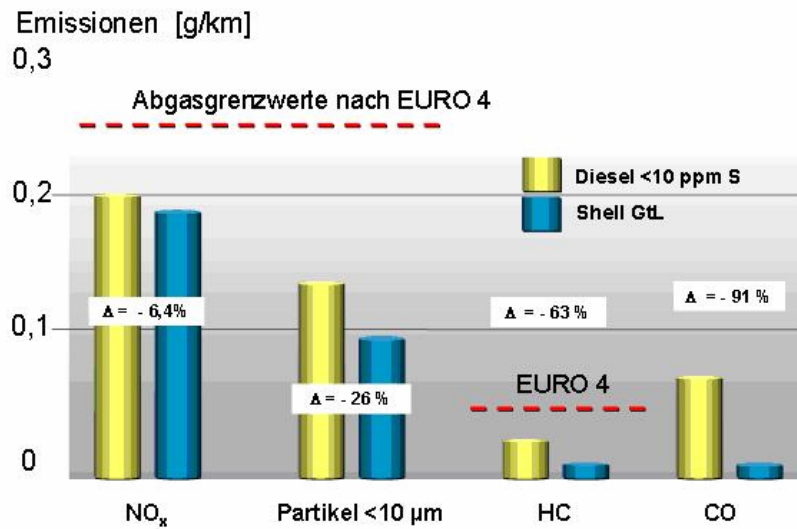


Abbildung 28, Quelle: VW 2006a

Das Emissionsverhalten des von Shell produzierten GtL-Kraftstoffs wurde in einem Flottenversuch an 25 Golf mit 1,9 l TDI Aggregat und 74 kW Antriebsleistung ohne Anpassungen der Motorsteuerung untersucht und mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff verglichen (VW 2006a). Folgende Ergebnisse wurden von VW veröffentlicht: Die Emissionen von NO_x und Partikeln reduzierten sich um 6% und 26%. Die Werte für die Kohlenwasserstoffe (HC) und CO konnten sogar um 63% und 91% vermindert werden. Entsprechend diesen Aussagen wurden die Emissionsdaten der Diesel- Basismodelle F_{1/1}, F_{5/1} und F_{6/1} reduziert und auf die „GtL-Derivate“ F_{1/6}, F_{5/6} und F_{6/6} übertragen.

Ebenfalls aus Datenbeständen des VW Konzerns (VW 2005, 8) stammen die Werte für BtL im folgenden Schaubild.

Schadstoffemissionen BtL im Vergleich zu Diesel

BtL-Emissionen*

relativ zu Diesel

* Motorsteuerung auf maximale NO_x-Reduktion abgestimmt.

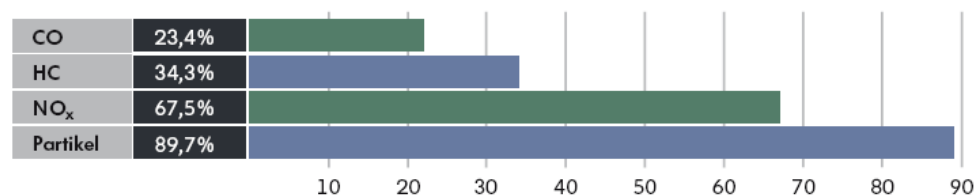


Abbildung 29, Quelle: VW 2005, 8

DaimlerChrysler und Volkswagen testeten den BtL-Diesel der Firma Choren in einem Golf TDI mit 103 kW Antriebsleistung. Im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ließen sich durch den Betrieb mit BtL die Emissionen gegenüber erdölbasiertem Diesel auf die in Abbil-

dung 29 angegebenen Anteile reduzieren. Wiederum ausgehend von den Diesel-Basismodellen wurden die Werte diesmal auf die BtL-Derivate $F_{1/7}$, $F_{5/7}$ und $F_{6/7}$ übertragen.

Für Biodiesel ($k=8$) wurden vergleichende Untersuchungen im Rahmen eines Forschungsprojekts der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig (FAL 2003, 44-48) durchgeführt. In einem direkteinspritzenden Dieselmotor kamen Biodiesel (RME) sowie herkömmlicher Dieselmotorkraftstoff zum Einsatz. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden auf unser Beispielfahrzeug $F_{1/8}$ übertragen und in die Matrix aufgenommen.

Für den Pflanzenölbetrieb ($k=9$) eines umgerüsteten Dieselmotors ($F_{1/9}$) griffen wir auf Vergleichsdaten der Projektorganisation Regionale Ölpflanzennutzung (P.R.O. 2003) zurück.

(Bio-)Ethanol ($k=10$) wird meist 15% Ottokraftstoff beigemischt und als E-85 bezeichnet. In Flexifuel-Motoren kann Ottokraftstoff auch in größerem Anteil getankt werden. Die Ökologiedaten des mit Ethanol betriebenen Ford Focus ($F_{1/11}$) wurden nach Angaben der Asian Development Bank (ADB 2006) errechnet.

Die Emissionswerte des Methanol-Jettas von VW ($F_{1/11}$) stammen aus Tests des „Department of Environmental Protection“ der Stadt New York (NYSERDA 1996, 69).

Für Biogas ($k=12$) gilt wiederum, dass die Verbrennungseigenschaften wegen des hohen Methananteils mit denen von Erdgas ($k=4$) als identisch angenommen werden können.

Durch den Einsatz von Wasserstoff ($k=14$ und 15) in Verbrennungsmotoren können Emissionen drastisch verringert werden. Der „Strategiekreis Wasserstoff“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit geht davon aus, dass die Emissionen bei H₂-Motoren mit äußerer Gemischbildung für CO und HC unter 1% der erlaubten Euro 4-Werte liegen (BMW 2005, 32). Dies entspricht Emissionen unter 10 mg/km für CO und unter 1 mg/km für HC. Die NO_x-Werte der Wasserstoffverbrennung hängen stark vom λ -Wert und den Temperaturen im Verbrennungsraum ab, wobei ein Zielkonflikt zwischen maximaler Leistung und minimalem NO_x-Ausstoß vorliegt. Über die Höhe der Stickoxid-Emissionen machen die Hersteller keine Angaben. BMW weist nur auf die Möglichkeit hin, die NO_x-Emissionen im stöchiometrischen Vollastbetrieb mit einem G-Kat und im Magerbetrieb aufgrund geringer Verbrennungstemperaturen zu minimieren. Die Motorsteuerung überspringt dabei den Bereich zwischen $\lambda=1$ und $\lambda=2$ vollständig (BMW 2006, 36, 37). Der Strategiekreis Wasserstoff geht von NO_x-Emissionen unter 9% des Euro 4-Grenzwertes (BMW 2005, 32) aus. Demnach liegen die NO_x-Werte eines H₂-Motors bei ca. 7 mg/km. Die Aussagen des Strategierates bezüglich der CO-, HC- und NO_x-Emissionen wurden für die Wasserstoff-Konfigurationen $F_{1/14}$ (Hydrogen 7 von BMW), $F_{1/15}$ (Ford Focus Cmax) sowie $F_{3/15}$ (Mazda Hydrogen RE 8) übernommen.

Die zweite Antriebskategorie, der 2-Takt-Hubkolbenmotor, wird durch den Trabant vertreten. Da die Produktion vor 15 Jahren eingestellt wurde (IFA 2006), und das Auto auch vorher keine Importgeschichte in die BRD aufweist, sind Emissionsdaten nicht durch das KBA erfasst. Selbst heutige Abgasreinigungssysteme, welche die limitierten Schadstoffe um ca. 1/3 reduzieren können, ermöglichen keine Einhaltung aller Grenzwerte für eine Einstufung in die Abgasnorm (Oettinger 2006).

Hybride ($a=5$ und 6) befinden sich bisher ausschließlich mit Ottomotor im Handel. Daher konnten gemessene und geprüfte Emissionswerte für die beiden Dieselhybrid-Basismodelle „DC Bluetec Hybrid“ ($F_{5/1}$) und „Peugeot 307“ ($F_{6/1}$) von uns nicht recherchiert werden und wurden daher von vergleichbaren Serienmodellen übernommen. Es ist aber anzunehmen, dass die Emissionswerte eines Hybriden, abhängig von der technischen Umsetzung des

Hybridsystems, besser ausfallen werden, denn durch die Möglichkeit des elektrischen Startens und Anfahrens läuft der Verbrennungsmotor eines Hybriden vermehrt in günstigeren Betriebspunkten. Diese Vermutung kann exemplarisch durch den Vergleich der Emissionen des am Markt verfügbaren Honda Civic IMA mit den Werten des vergleichbaren, nicht-hybriden, Honda Jazz bestätigt werden. Letztere ist vergleichbar motorisiert, erzielt jedoch durchweg schlechtere Emissionswerte. Ausgehend von den beiden Dieselhybrid-Basismodellen wurden anhand der vorangegangenen Aussagen über das Emissionsverhalten von GtL, BtL und Bio-Diesel die Werte der Diesel-Derivate $F_{5/5}$, $F_{5/7}$ und $F_{5/8}$ und $F_{6/5}$, $F_{6/7}$ und $F_{6/8}$ berechnet. Der erdgasbetriebene Prius ($F_{6/5}$) stellt ein „Otto-Derivat“ des Basismodells $F_{6/2}$ dar. Die Werte wurden anhand eines generellen Emissionsdatenvergleichs zwischen Erdgas und Benzinfahrzeugen errechnet (Kölnerbucht 2006).

Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge ($a=7$ und 8) emittieren in einer „Tank to Wheel-Betrachtung“ systembedingt keine Schadstoffe, da weder in einer Batterie noch in Brennstoffzellen-Fahrzeugen Verbrennungen stattfinden. Als elektromotorisch angetriebene Fahrzeuge zählen sie zu den Nullemissionsfahrzeugen. Diese Aussage muss jedoch eingeschränkt werden. Denn bei dem „Necar 5“ ($F_{8/11}$) von DaimlerChrysler handelt es sich zwar auch um ein Brennstoffzellenfahrzeug mit Elektromotor, jedoch mit der Besonderheit, dass der Wasserstoff bei diesem Fahrzeugkonzept „on-board“ mittels eines Methanolreformers erzeugt wird. Der Reformierungsprozess bedingt Schadstoffemissionen, welche zu berücksichtigen sind. Da der Reformer aber bei 280°C (Hycar 2007) arbeitet, ist die Bildung von thermischem NO, dem Hauptanteil der NO_x Emissionen, ausgeschlossen, da diese erst ab 1300°C stattfindet (FAL 2003, 8). Dies bestätigt auch die Aussage von DaimlerChrysler, dass bei NECAR 5 im Fahrbetrieb weder NO_x - noch Partikel-Emissionen entstehen und CO_2 um 30% reduziert werden kann (Ebner 2001, 3).

Neben den stofflichen Emissionen werden auch Schallwellen beim Betrieb eines Autos emittiert. Die „Lärmwerte“ der Beispielm Modelle sind in der Spalte e=17 aufgeführt. Für zugelassene Fahrzeuge erfasst das KBA die Geräuschemissionen eines Fahrzeugs im Stand und während der Fahrt. Das Standgeräusch dient dabei als Vergleichswert für die Entwicklung der Geräuschemissionen eines Fahrzeugs während seiner Nutzungsdauer im Straßenverkehr und ist somit der Grundwert in Spalte 17 der Evaluations-Matrix. In Klammern ist das Fahrgeräusch angegeben, das die beschleunigte Vorbeifahrt im Straßenverkehr nachbildet. Die höheren Geräuschpegel für die meisten Standwerte erklären sich aus den unterschiedlichen Messverfahren für Stand- und Fahrgeräusche.

Für die richtige Interpretation der Werte ist zu beachten, dass kein linearer Zusammenhang zwischen den einzelnen Dezibelangaben in Spalte 17 besteht. Denn eine Zunahme um zehn Dezibel entspricht einer Verdoppelung der Lautstärke. Zur Beurteilung der Werte in der Tabelle ist es hilfreich, sich folgende Geräusche und ihre Schallpegel zu vergegenwärtigen: 20 db: Ticken einer Armbanduhr; 55 dB: normales Gespräch; 65 dB: Kantinenlärm; 70 dB: Fernseher, Schreien, Rasenmäher; 80 dB: Telefonläuten, Presslufthammer; 90 dB: Lastwagen; 120 dB: Kettensäge (Welt-Online 2007).

Aus den Werten in e=17 geht hervor, dass die Lärmemissionen der verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeuge zwischen 78 und 84 dB liegen. Mit einem Standwert von 66 dB ist der Toyota Prius ($F_{6/2}$) vergleichsweise leise und die wahrnehmbare Lärmreduktion beträgt über 50% gegenüber den Modellen mit Verbrennungsmotor. Grund hierfür ist, dass

bei einem Vollhybriden im Stand nur der leise Elektromotor in Betrieb ist. Noch leiser sind Brennstoffzellenfahrzeuge, welche ausschließlich elektromotorisch betrieben werden. Exemplarisch hierfür sind Untersuchungen an dem Brennstoffzellen-Bus „NEBUS“ von DaimlerChrysler, Messungen ergaben sowohl im Leerlauf als auch im Fahrbetrieb bei 50 km/h Geräuschemissionen von 56 und 57 dB (Gerl 2002, 180). Damit sind die Brennstoffzellenfahrzeuge im unteren Geschwindigkeitsbereich deutlich leiser als Autos mit Verbrennungsmotor. Dies liegt vor allem daran, dass zur elektrochemischen Stromerzeugung in Brennstoffzellen keine bewegten Teile notwendig sind. Die Geräuschemissionen des Brennstoffzellen-Busses wurden auf alle elektromotorisch angetriebenen Beispielmotoren übertragen, also auf den Plug-In-Hybrid ($F_{6/13}$), das Batterie-Fahrzeug ($F_{7/13}$) und die Brennstoffzellen-Modelle ($F_{8/11}$, $F_{8/14}$ und $F_{8/15}$). Abschließend sei darauf hingewiesen, dass bei höheren Geschwindigkeiten Wind- und Abrollgeräusche der Reifen dominieren. Dabei unterscheiden sich konventionelle und brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge kaum noch in der Geräuschkentwicklung.

Evaluationsbereich Ranking

Versuche, ein Fahrzeug-Ranking durchzuführen sind nicht neu. Ökologische Bewertungen von Fahrzeugen werden beispielsweise in Deutschland durch den ADAC und den VCD (Verkehrsclub Deutschland) durchgeführt. Auf europäischer Ebene wurde im Rahmen des 5. Forschungsrahmenprogramms der EU der „Cleaner Drive Index“, erstellt. In den USA wird der Green-Vehicle Guide durch die EPA (Environmental Protection Agency) herausgegeben. Stichwortartig lassen sich diese Rankings wie folgt zusammenfassen

- Deutschland: ADAC Eco-Test (ADAC 2006a, ADAC 2006b))
- Deutschland: VCD Auto-Umweltliste (VCD 2006a)
- EU: Cleaner Drive Index (e-mobile 2007b)
- USA: Green-Vehicle Guide (USEPA 2007)

Unser Focus liegt auf den beiden deutschen Rankings. Üblicherweise beinhalten Rankings die Bewertung der mit dem Verbrauch einhergehenden CO₂-Emissionen sowie der in der europäischen Abgasnorm limitierten Schadstoffen CO, HC, NO_x und PM. Neben der Ermittlung der für die Typenzulassung notwendigen gesetzlich vorgeschriebenen Schadstoffe sind die Hersteller auch verpflichtet, die CO₂-Emissionen gemäß Richtlinie 80/1268/EWG zu ermitteln. Beide Informationen werden durch das KBA systematisch für alle typenzugelassenen Fahrzeuge erfasst und veröffentlicht. Im Prinzip bedarf es daher keines Rankings. Der Verbraucher kann selbst für „sein“ Fahrzeug die Werte recherchieren. Allerdings ist das Zahlenwerk des KBA sehr umfangreich und komplex und nicht in erster Linie für den Verbraucher vorgesehen. Vor allem muss die Gretchen-Frage, was überhaupt ein ökologisches Fahrzeug ist, geklärt werden. Denn für den CO₂-Ausstoß gibt es weder eine gesetzliche Reglementierung noch ein allgemeingültiges und akzeptiertes »Labelsystem«, welches dem Verbraucher schnell und verständlich Auskunft über den CO₂-Ausstoß gibt.

Demnach sind Unterschiede in den Rankings nicht auf ungenaue oder unterschiedliche Emissionsangaben der Hersteller zurückzuführen, sondern vielmehr auf das gewählte

Bewertungssystem und den »Interessen« des »Rankers«. Folgende Fragen schaffen Spielraum und geben jedem Ranking einen subjektiven Anstrich: Was ist das Benchmark? Welche Modelle wurden gewählt? Wurde in Modelklassen gewertet? Mit welcher Gewichtung gehen CO₂-Emissionen und die Euro-Schadstoffe in die Wertung ein?

Allein schon der Vergleich der beiden Deutschen-Rankings ist interessant. So fällt im ADAC Eco-Test auf, dass unter den zehn bestbewerteten Fahrzeugen kein Kleinwagen ist. Aus der Kompaktklasse sind nur die Hybridmodelle von Toyota und Honda vertreten. Bei dem VCD hingegen sieht die Lage genau umgekehrt aus: Mit Ausnahme der Hybridmodelle sind hier ausschließlich Kleinwagen in den Top Ten.

Die Ursache für diese markante Unterschiedlichkeit liegt an den verschiedenen Bewertungssystemen der Rankings. Bei dem ADAC handelt es sich um ein »Klassenranking«, die VCD Umweltliste stellt ein »absolutes Ranking« dar. Etwas vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass es bei dem ADAC-Vergleich jeweils einen bestimmten Bestwert für jede Klasse gibt. Je näher ein Fahrzeug an diesen Bestwert herankommt, desto höher seine Bewertung. Es ist auffallend, dass beim ADAC die höher motorisierten Fahrzeuge der oberen Mittelklasse und der Oberklasse leichter in den Bereich des Klassenbestwerts kommen und damit bessere Noten erhalten, als dies bei eher niedermotorisierten Fahrzeugen der Fall ist. So kann bei undifferenzierter Betrachtungsweise der Eindruck entstehen, ein Oberklasse-Fahrzeug sei »ökologischer« als ein Kleinwagen. Es sei auch darauf hingewiesen, dass der Eco-Test im Auftrag des Weltverbandes der Automobilclubs FIA (Fédération Internationale de l'Automobile) durchgeführt wird und dessen Aufgabe in der Förderung des Automobilsports und des internationalen Kraftverkehrs liegt.

Bei dem VCD-Ranking erfolgt zwar auch eine Zusammenstellung von Fahrzeugen gleicher Klasse, allerdings stellt das Maß der Dinge nicht ein Klassenbestwert dar, sondern ein absoluter Bestwert, an dem sich alle Fahrzeuge messen müssen. Die Effizienzvorteile von kleinen und leichten Fahrzeugen kommen damit deutlicher zum Tragen und unter den VCD-TOP10 finden sich, wie bereits erwähnt, vornehmlich Kleinwagen. Der VCD ist ein Verkehrsclub mit dem Ziel der Förderung von ökologischer und sozialverträglicher Mobilität und versteht sich als die »ökologische Alternative« zum ADAC.

Anhand der beiden deutschen Rankings wird deutlich, wie sehr interessengesteuert Rankings ausfallen können. Übrigens, beide Rankingarten haben natürlich auf ihre Art auch eine Berechtigung. Denn die fünfköpfige Familie bringt die Tatsache, dass die zehn umweltfreundlichsten Fahrzeuge Kleinwagen sind, herzlich wenig, sondern vielmehr die Information, welches Auto familientauglich und gleichzeitig umweltfreundlich ist. Dabei sollte aber nicht der Eindruck suggeriert werden, dass ein Oberklassenfahrzeug ein ökologisches Auto für einen Single darstellt. Der Vergleich der Rankings zeigt die Notwendigkeit einer Art interessensunabhängiger Ranking-Norm, vor allem sind für CO₂ wohlüberlegt Grenzwerte festzulegen.

Das von uns angeregte Ranking unterscheidet sich von diesen und anderen klassischen Verfahren in mehrfacher Hinsicht: Erstens ist dieses Ranking systematisch aus einer interdisziplinären innovationstheoretischen Perspektive entwickelt und auf Innovationen fokussiert. Ausgehend von einer Analyse des breiten Feldes antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen wurde zunächst eine qualitative Innovations-Matrix entwickelt, aus der dann die quantifizierte Evaluations-Matrix abgeleitet werden konnte, die die Grundlage des Rankings liefert. Zweitens stellt das solcherart auf der Innovations- und Evaluations-Matrix

basierende Ranking eine Heuristik für die neu beziehungsweise weiter zu entwickelnden datentechnischen Mess- und Normierungsverfahren dar. Drittens ist das Ranking diskursiv offen. Es kann durch eine Erweiterung und Differenzierung sowohl der Evaluations-Bereiche und Kennwerte als auch der Fahrzeugkonfigurationen spezifiziert werden. Viertens schließlich ermöglicht die Struktur der Evaluations-Matrix mit ihren unterschiedlichen Evaluationsbereichen den Auf- und Ausbau eines mehrdimensionalen Rankings, in dem technische, ökonomische, ökologische und weitere mögliche Rankings miteinander verbunden und kombiniert werden können.

Ausgehend davon lässt sich das von uns gewählte Ranking stichpunktartig wie folgt beschreiben:

Unter einem Ranking ist die an- oder absteigende Anordnung der zu einem Evaluations-Parameter (Spalte) zugehörigen Evaluations-Felder zu verstehen. Durch diese „Spaltensortierung“ wird ersichtlich, welche Fahrzeugkonfiguration $F_{a/k}$ am besten bzw. am schlechtesten abschneidet und ein „Ranking“ mit Platzierungen wird möglich. Je nach Parameterwahl ist diejenige Fahrzeug-Konfiguration mit dem größten oder dem kleinsten Spaltenwert die „Erstplazierte“ bzw. die „Letztplazierte“.

Es wird im Weiteren zwischen „absoluten“ und „relativen“ Rankings unterschieden. Bei einem absoluten Ranking wird nur ein Parameter innerhalb eines Bereichs einem Ranking unterzogen. Bei einem relativen Parameter wird ein Parameter in Bezug zu einem anderen gesetzt.

Neben den 18 absoluten Rankingmöglichkeiten der Einzelspalten sind eine Vielzahl, genau genommen 272, weitere Rankings möglich, wobei anzumerken ist, dass natürlich nicht jeder dieser kombinatorischen Möglichkeiten Sinn macht. Zur Illustration wurden beispielhaft ein absolutes und ein relatives Ranking für die Kohlendioxid-Emissionen aus der Spalte $e=12$ durchgeführt. Die Ergebnisse sind den Spalten $e=18$ und 19 aus dem Evaluationsbereich Ranking zu entnehmen.

Spalte $e=18$ zeigt das absolute CO_2 -Ranking. Wie zu erwarten war, belegen die Elektroantriebe Platz eins, da sie lokal kein CO_2 emittieren. Zu den Gewinnern zählen der Batterie-Elektroantrieb $F_{7/13}$, der Plug-In-Hybrid $F_{6/13}$ im Elektromodus sowie die wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen-Konfigurationen $F_{8/14}$ und $F_{8/15}$. Auf Platz zwei liegen die beiden Fahrzeuge $F_{1/14}$ und $F_{1/15}$ mit Wasserstoffverbrennungsmotoren. Die minimalen CO_2 -Emissionen dieser Fahrzeuge sind nicht kraftstoffbedingt, sondern auf die Verbrennung von Schmieröl zurückzuführen. Eine detaillierte Diskussion der CO_2 -Emissionen erfolgt in Kapitel 5.1.

Das relative Ranking in Spalte 19 setzt den Kohlendioxid-Ausstoß aus Spalte $e=12$ in Bezug zu dem Fahrzeug-Gewicht aus Spalte $e=1$. Es zeigt sich, dass „relativ gesehen“ die schweren Fahrzeuge besser abschneiden. Sie emittieren natürlich mehr CO_2 an die Umgebung, aber nicht in dem Maße ihrer Gewichtszunahme. Liegt beispielsweise der schwergewichtige Diesel-Mildhybrid von DaimlerChrysler ($F_{5/1}$) in der absoluten Betrachtung auf Platz 15, so schneidet er in der relativen Betrachtung deutlich besser ab und liegt auf Platz 7.

5. Ziel/Ist-Vergleiche Schadstoffemissionen

Die Evaluations-Matrix stellt anhand der von uns ausgewählten Beispielm Modelle den quantifizierten Entwicklungsstand der in Kapitel 3 als Innovationen identifizierten Fahrzeug-Konfigurationen dar. Die Matrixeinträge verstehen sich als eine empirische Momentaufnahme aus dem Jahr 2006 und können als »Ist-Werte« für Ziel/Ist-Vergleiche aufgefasst werden. In diesem Kapitel möchten wir nun diese Ist-Werte mit bestimmten Ziel-Werten vergleichen. »Ziel-Werte« können beispielsweise Anforderungen aus der Emissionsgesetzgebung, Selbstverpflichtungen der Automobilindustrie oder Umweltabkommen wie das Kyoto-Protokoll sein. Die Ziel/Ist-Vergleiche ermöglichen Aussagen darüber, welche Fahrzeug-Konfiguration den zu definierenden Ziel-Werten genügt bzw. wie weit sie von diesen entfernt liegen.

In diesem Kapitel wollen wir drei exemplarische Vergleiche für die Evaluations-Größen $e=13,15$ und 16 im Evaluations-Bereich »Ökologie« durchführen. Erstens werden die Kohlendioxid-Emissionen ($e=13$) der Beispielm Modelle mit der Selbstverpflichtung der europäischen Automobilindustrie sowie den Zielen der EU verglichen. In einem zweiten Vergleich sollen die Stickoxidemissionen ($e=16$) mit den entsprechenden Ziel-Werten aus der Euro-Norm in Bezug gesetzt werden. Und Drittens wollen wir die Partikel-Emissionen ($e=17$) näher betrachten. Aufgrund der derzeitigen hohen politischen und gesellschaftlichen Brisanz wurden die drei genannten ökologischen Evaluationsgrößen von uns ausgewählt. Die Methodik der Ziel/Ist-Vergleiche kann jederzeit auf andere Evaluationsgrößen aus den Bereichen »Technik« oder »Ökonomie« übertragen werden.

Im Anschluss an die drei Einzel-Vergleiche werden diese zu einer ökologischen »Gesamtschau« zusammengeführt und in Form eines Netz- und eines Blasendiagramms visualisiert.

5.1. Kohlendioxid

Zuerst betrachten wir die CO_2 -Emissionen. Der Kohlendioxidausstoß kann über die Kraftstoffart und den Kraftstoffverbrauch gesenkt werden. Je geringer der Kohlenstoffanteil in einer chemischen Verbindung ist, umso weniger CO_2 entsteht bei der Verbrennung. Der Verbrauch hängt von der Fahrzeugmasse, der Dimensionierung der Motorisierung sowie der gewählten Antriebstechnologie ab. Bei der Verbrennung von einem Liter Benzin entstehen beispielsweise 2.3 kg Kohlendioxid (Spiegel-Online 2006).

Der Verband der europäischen Automobilhersteller (ACEA) hat sich 1998 verpflichtet, die mittleren CO_2 -Emission aller neu zugelassenen Pkw von 187 g/km im Jahr 1995 um 25% auf 140 g/km im Jahr 2008 zu senken (UBA 2006c). Die japanischen und koreanischen Hersteller wollen dieses Ziel bis 2009 erreicht haben (Europäische Kommission 2007). Im Rahmen der Strategie zur Minderung der CO_2 -Emissionen verfolgte die Europäische Kommission zunächst das politische Ziel, die durchschnittlichen CO_2 -Emissionen aller Pkw bis spätestens 2010 auf 120 g/km zu senken (EP 2000). Dieses Ziel wurde dann allerdings auf Druck der Automobilindustrie auf 2012 verschoben (businessportal24). Dieser Wert entspricht einem Verbrauch von 4,5 Liter Diesel bzw. 5,0 Liter Benzin auf 100 Kilometer. Aktuell, im Februar 2007, wurde das Ziel erneut aufgeweicht. Die neue Strategie hält zwar an den 120 g/km fest, nimmt aber nicht mehr die Automobilindustrie alleine in die Pflicht. Diese ist gefordert, durch

Verbesserungen der Fahrzeugtechnologie die durchschnittlichen Emissionen auf 130 g/km zu senken. Weitere 10 g/km sollen durch Effizienzverbesserungen bei den Fahrzeugkomponenten, z.B. Reifen und Klimaanlage, und eine schrittweise Umstellung auf kohlenstoffärmere Kraftstoffe, insbesondere durch Beimischung von Biokraftstoffen, erreicht werden (CO₂-Handel 2007).

In der folgenden Abbildung 32 sind die CO₂-Emissionen der gewählten Beispielmotoren (Spalte: IST 2006) der Selbstverpflichtung der Automobilindustrie (Spalte: ZIEL 2008) und den Forderungen der EU (Spalte: ZIEL 2012) als Zielwerte gegenübergestellt. In den Spalten DELTA 2008 und DELTA 2012 sind die Abweichungen der Beispielmotoren von den Zielwerten zu erkennen. Der Übersicht halber sind diejenigen Fahrzeug-Konfigurationen entfallen, für welche keine IST-Werte recherchierbar waren. Dabei handelt es sich vor allem um den Diesel-Trabbi (F_{2/1}), den Betrieb eines 4-Takters mit flüssigem Erdgas (F_{1/4}) sowie den Betrieb eines Mildhybriden mit Erdgas (F_{5/5}). Das „x“ bei den elektrischen Antrieben soll verdeutlichen, dass hier Kohlendioxidemissionen technologisch ausgeschlossen sind, da in diesen Konfigurationen keine Verbrennungsprozesse ablaufen.

Ziel/Ist-Vergleich Kohlendioxid-Emissionen

Fahrzeug-Konfiguration			Beispielmodell	IST 2006	ZIEL 2008	DELTA 2008	ZIEL 2012	DELTA 2012
Antrieb (a)	Kraftstoff (k)	Konfig. F (a/k)		CO2 [g/km]	CO2 [g/km]	CO2 [g/km]	CO2 [g/km]	CO2 [g/km]
4 Takt-Hubkolbenmotor (1)	Diesel (1)	(1/1)	VW Golf V	135	140	- 5	120	+15
	Benzin (2)	(1/2)	Ford Focus 5T	167	140	+27	120	+47
	LPG (3)	(1/3)	Ford Focus 4T	168	140	+ 28	120	+ 48
	CNG (5)	(1/5)	Opel Astra Caravan	119	140	-21	120	- 1
	GTL (6)	(1/6)	VW Golf V	135	140	-5	120	+15
	BTL (7)	(1/7)	VW Golf V	135	140	-5	120	+15
	RME (8)	(1/8)	VW Golf V	133	140	-7	120	+13
	PöL (9)	(1/9)	VW Golf V	131	140	-9	120	+11
	Bio-Ethanol (10)	(1/10)	Ford Focus FFV	138	140	-2	120	+18
	Bio-Methanol (11))	(1/11)	VW Jetta FFV	209	140	+69	120	+89
	Biogas (12)	(1/12)	Opel Astra Caravan	119	140	-21	120	- 1
	LH2 (14)	(1/14)	BMW Hydrogen7	ca. 5	140	-135	120	- 115
	CGH2 (15)	(1/15)	Ford Focus Cmax	ca.5	140	-135	120	-115
2-Takt-Hubmotor (2)	Benzin (2)	(2/2)	Trabant P 601L	130	140	-10	120	+10
Wankelmotor (3)	Benzin (2)	(3/2)	Mazda RX-8	267	140	+127	120	+147
	CGH2 (15)	(3/15)	Mazda Hydrog. RE	ca.5	140	-135	120	--115
Mild Hybrid (5)	Diesel (1), GtL (5), BtL (6)	(5/1), (5/5), (5/6)	DC Bluetec Hybrid	204	140	+64	120	+84
	Benzin (2)	(5/2)	Honda Civic IMA	116	140	-24	120	-4
	RME (8)	(5/8)	DC Bluetec Hybrid	201	140	+61	120	+81
Voll Hybrid (6)	Diesel (1), GtL(5), BtL (6)	(6/1), (6/5), (6/6)	Peugeot 307	90	140	-50	120	-30
	Benzin (2)	(6/2)	Toyota Prius II	104	140	-36	120	-16
	CNG (5)	(6/5)	Toyota Prius II	92	140	-48	120	-28
	RME (8)	(6/8)	Peugeot 307	89	140	-51	120	-31
	Strom (13)	(6/13)	Toyota Prius II	X	140	-140	120	-140
Batt.-El.-antrieb (7)	Strom (13)	(7/13)	Renault Twingo	X	140	-140	120	-120
Brennstoffzellen-Elektroantrieb (8)	Bio-Methanol (11)	(8/11)	DC Necar 5	61	140	-79	120	--59
	LH2 (14)	(8/14)	Opel HydroGen 3	X	140	-140	120	-120
	CGH2 (15)	(8/15)	DC F-Cell	X	140	-140	120	-120

X: keine Emission (Null-Emissions-Fahrzeug)

Abbildung 30, Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 30 verdeutlicht, dass mit konventionellen Antriebstechniken und Kraftstoffen die Zielwerte für 2008 größtenteils nicht erreicht werden können. Lediglich mit optimierten Dieselmotoren, wie beispielsweise im Golf V, lassen sich die 2008er Werte gerade einhalten. Eine weitere Verbrauchsoptimierung auf die angestrebten 120 g/km bis 2012 dürfte in diesem Zeitraum aber kaum möglich sein. Hinzu kommt, dass Dieselkraftstoff zwar bei dem CO₂-Ausstoß gegenüber Benzin vergleichsweise gut abschneidet, jedoch deutlich höhere Stickoxid- und Rußemissionen aufweist. Die CO₂-Emissionen des Ford Focus im Benzin- als auch im LPG-Betrieb ($F_{1/2}$ und $F_{1/3}$) lagen 2006 noch deutlich über den angestrebten 140 g/km. Der Wert des Focus liegt allerdings noch unterhalb des durchschnittlichen CO₂-Ausstoßes für Neuwagen aus Deutschland. Dieser lag nämlich im Jahr 2006 bei 172,5 g/km (EurActiv 2007). Um den Zielwert von 140 g/km zu erreichen, wäre eine Reduktion um knapp 20% in zwei Jahren notwendig, dies erscheint allerdings eher unrealistisch zu sein.

Mit alternativen Kraftstoffen und Antriebstechnologien können hingegen die Ziele vergleichsweise leicht erreicht werden. Der erdgasbetriebene Opel Astra ($F_{1/6}$) liegt mit 119 g/km bereits heute unter dem EU-Ziel für 2012. Auch mit antriebstechnologischen Innovationen ist es möglich, gegenüber der Konvention signifikante Verbesserungen zu erzielen. So liegen beispielsweise die marktverfügbaren Hybridmodelle von Honda (Honda Civic, $F_{5/2}$) und Toyota (Toyota Prius, $F_{6/2}$) beide schon jetzt unterhalb der 120 g/km-Marke. Besonders interessant ist in dieser Hinsicht der Erdgasbetrieb des Prius, da sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig die Konvention verlassen wird und damit die CO₂-Emissionen auf 92 g/km reduziert werden können. Die aufgeführten Bio-Kraftstoffe ($k=8$ bis 12) sind in einer ganzheitlichen Betrachtungsweise als CO₂-neutral einzustufen, da es sich um nachwachsende Energieträger handelt. Unsere Untersuchung bilanziert jedoch die ökologische Wandlungseffizienz der Beispielmotive vom Tank aufs Rad, so dass »lokal« gesehen sehr wohl CO₂ entsteht.

Wasserstoff als kohlenstofffreier Energieträger produziert per se kein Kohlendioxid bei der Verbrennung beziehungsweise bei der Wandlung in einer Brennstoffzelle und leistet insofern den größten Beitrag zur lokalen CO₂-Reduktion. Die Angabe von 5 mg von BMW ($F_{1/14}$) ist auf die Verbrennung von Schmierölen zurückzuführen. Allerdings möchten wir an dieser Stelle auf die Gesamtbilanz des Wasserstoffs aufmerksam machen, denn bei der Wasserstofferzeugung aus kohlenstoffhaltigen Primärenergieträgern, wie zum Beispiel aus Erdgas, entsteht sehr wohl Kohlendioxid. Ebenso bei einer Erzeugung über Elektrolyse von Wasser, hier hängt die Bilanz von der Qualität des eingesetzten Stroms ab. Abbildung 31 verdeutlicht die gesamte CO₂-Bilanz vom Bohrloch bis aufs Rad für verschiedenen Pfade der Wasserstofferzeugung und -Wandlung:

CO₂-Sparpotenzial von Wasserstoff

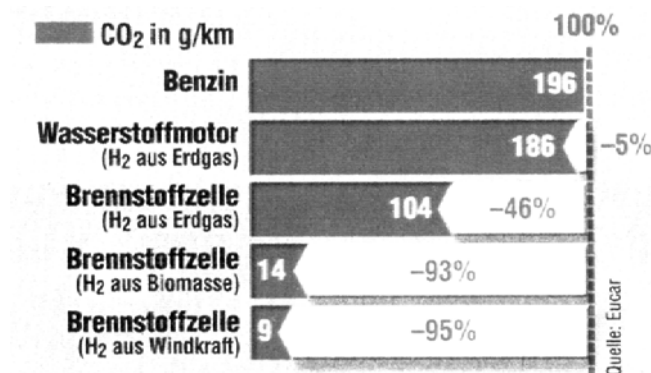


Abbildung 31, Quelle: AMS 2007, 147

Aus der Darstellung geht hervor, dass bei der Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas und anschließender Wandlung in einer Brennstoffzelle ein durchaus beachtliches CO₂-Reduktionspotenzial von 46% möglich ist. Im Wasserstoffverbrennungsmotor ist allerdings aufgrund des gegenüber der Brennstoffzelle schlechteren Wirkungsgrads das CO₂-Sparpotenzial nur sehr gering. Am besten fällt die Bilanz bei der Herstellung von regenerativem Wasserstoff aus Biomasse oder Windkraft aus.

Zusammenfassend macht der Soll-Ist-Vergleich deutlich, dass eine signifikante und zeitnahe CO₂-Reduktion nur durch den Einsatz nicht-konventioneller beziehungsweise alternativer Antriebe und Kraftstoffe gelingen kann. Hierfür ist es jedoch notwendig, den Pfad der Konvention endgültig zu verlassen und das stagnorative Beharrungsvermögen der fossilen Verbrennungsmotorik zu überwinden. Um die gegenwärtigen Ziel-Anforderungen der EU mit konventioneller Technologie zu erreichen, wäre eine konsequente Reduktion des Fahrzeuggewichtes und der Antriebsleistung notwendig. Dies wiederum würde allerdings einen radikalen gesellschaftlichen Paradigmenwechsel weg von der „Rennreiselimousine“ (Canzler/Knie 1994, 7-11) hin zum »Öko-Auto« bedeuten. Dies erscheint jedoch kurzfristig eher unwahrscheinlich.

Die Schwierigkeiten, den Verbrauch und damit die CO₂-Emissionen mit konventionellen Fahrzeugen zu verringern, zeigt auch eine Studie des Europäischen Verbands für Verkehr und Umwelt (T&E 2006). Der Verband hat die bisherigen Anstrengungen der Automobilhersteller, ihr selbst gesetztes Ziel zu erreichen, analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 32 dargestellt.

Vergleich der durchschnittlichen CO₂-Verbräuche eines Neuwagens von verschiedenen Herstellern in den Jahren 1997 und 2005

Ranking	Brand	2005 sales	CO ₂ emissions in g/km				% of target achieved
			1997 average	2005 average	reduction 1997 - 2005	reduction target	
1	Fiat	681,613	169	139	-30	-21	140%
2	Citroen	875,389	172	144	-28	-24	115%
3	Renault	1,361,607	173	149	-25	-25	100%
4	Ford	1,167,602	180	151	-29	-30	95%
5	Peugeot	1,049,819	177	151	-26	-28	94%
6	Opel/Vauxhall	1,262,798	180	156	-24	-30	81%
7	Toyota	704,723	189	163	-26	-35	76%
8	Kia	231,434	202	170	-32	-44	72%
9	Skoda	265,486	165	152	-13	-19	71%
10	Seat	344,693	158	150	-8	-13	63%
11	Honda	224,258	184	166	-18	-31	60%
12	Mercedes-Benz	626,824	223	185	-38	-64	59%
13	Hyundai	294,468	189	170	-19	-34	57%
14	Volkswagen	1,387,628	170	159	-11	-22	48%
15	BMW	575,087	216	192	-23	-58	40%
16	Volvo	224,415	219	195	-24	-61	39%
17	Audi	582,220	190	177	-13	-38	35%
18	Mazda	214,105	186	177	-9	-32	27%
19	Suzuki	172,941	169	165	-4	-20	22%
20	Nissan	332,742	177	172	-5	-26	20%

Abbildung 32, Quelle: T&E 2006

Die Studie geht davon aus, dass die durchschnittliche Emission der Neuwagenflotte eines Autobauers im Jahr 2005 nicht über 148 g CO₂ pro km liegen darf, um das Ziel von 140 g/km im Jahr 2008 zu erreichen. Lediglich Fiat, Citroen und Renault konnten dieses Zwischenziel erreichen. Die deutschen Autobauer liegen allesamt weit entfernt von ihren Zielen. Es bleiben also den europäischen Autoherstellern knapp zwei Jahre, um die Kohlendioxid-Emissionen ihrer Autos im Industriedurchschnitt auf 140 Gramm je Kilometer zu senken. Ein Ziel, das sie nach Expertenmeinung mit großer Wahrscheinlichkeit verfehlen werden (Handelsblatt 2006). Umweltkommissar Stavros Dima drohte bereits mit einer gesetzlichen Verpflichtung zur Kohlendioxid-Reduzierung (ebenda). Sollte es zu einem CO₂-Gesetz kommen, werden die Autobauer zunehmend gezwungen sein, kleinere Fahrzeuge sowie Fahrzeuge mit neuen Antriebskonzepten und Kraftstoffen auf dem Markt anzubieten.

5.2 Stickoxide

Der zweite Vergleich betrifft die Stickoxidemissionen. Stickoxide (NO_x) sind für die Bildung des bodennahen und gesundheitsschädlichen Ozons mitverantwortlich und führen beim Menschen zu Atembeschwerden und -erkrankungen. Außerdem gelten Stickoxide als Mitverursacher des »sauren Regens«.

Die Vorgaben der im Jahr 2005 in Kraft getretenen Euro 4-Abgasnorm definieren die derzeit einzuhaltenden NO_x-Emissionswerte für Neuwagen. Die Euro 4-Werte sind demnach

bereits »State of the Art« und als anzustrebende Ziel-Werte nicht ausreichend. Daher wurden als Zielgrößen die am 13. Dezember 2006 durch das europäische Parlament verabschiedeten Normen Euro 5 und Euro 6 gewählt (EP 2006). Die zukünftige Gesetzgebung sieht vor allem strengere Emissionsgrenzwerte für Stickoxide und Partikel vor. Euro 5 soll am 1.9.2009 in Kraft treten und Euro 6 fünf Jahre später am 1.9.2014.

In Abbildung 33 ist die Entwicklung der zulässigen Stickoxidwerte von Euro 3 bis Euro 6 für Diesel- und Benzinfahrzeuge dargestellt. Aufgrund der großen Bedeutung von Dieselfahrzeugen in Europa unterscheidet die Euro-Norm zwischen Emissionsvorgaben für diesel- und benzinbetriebene Pkw. In Kalifornien hingegen spielen Dieselfahrzeuge keine wesentliche Rolle und die Gesetzgebung legt dort einheitliche Werte fest. Die beiden Linien in der Abbildung stellen die NO_x-Grenzwerte dar, um in Kalifornien als ULEV- bzw. SULEV-Fahrzeug zugelassen zu werden. Die Werte liegen bei 40 mg/km für ULEV beziehungsweise bei 12 mg/km für SULEV (CARB 2005, 46).

Entwicklung der Stickoxidemissionen (NO_x) für Pkw in der EU-Abgasnorm

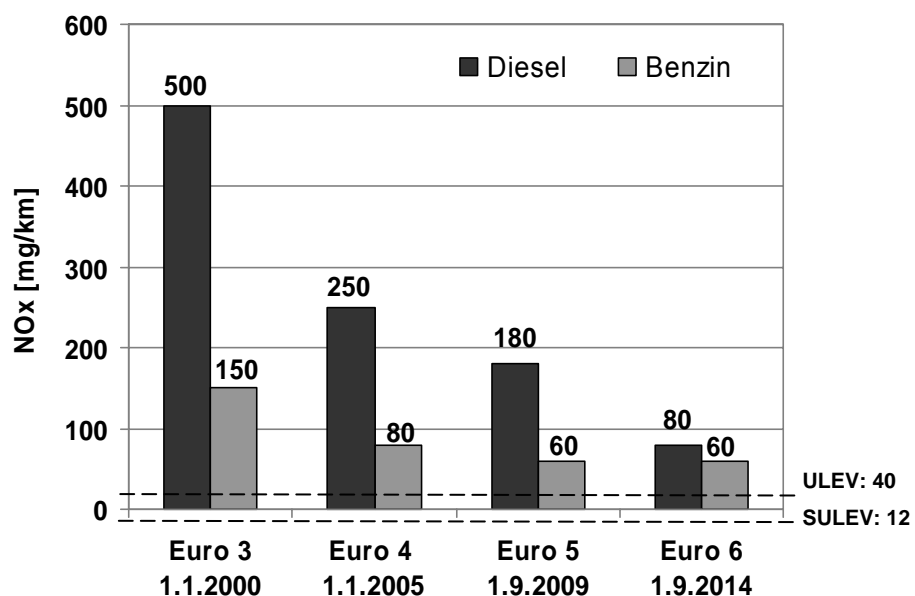


Abbildung 33: Quelle: eigene Darstellung, UBA 2006a, EP 2006

In dem nun in Abbildung 34 durchgeführten Ziel/Ist-Vergleich finden sich die Euro 5- und Euro 6-Werte als Ziel-Größen in den beiden Spalten »ZIEL Euro 5 2009« und »Ziel Euro 6 2014« wieder. Je nach dem, ob es sich um eine Diesel- oder eine Benzin-Konfiguration handelt, wurden die entsprechenden Werte der Euro-Norm als Zielgrößen herangezogen. Neben Diesel selbst können auch die synthetischen Kraftstoffe GTL (k=6), BTL (k=7) sowie Biodiesel (k=8) und Pflanzenöl (k=9) im Dieselmotor verbrannt und daher mit den Diesel-Zielgrößen in Beziehung gesetzt werden. Alle anderen Kraftstoffe werden in ottobasierten Motoren eingesetzt. Die beiden Spalten »DELTA Euro 5« und »DELTA Euro 6« geben Auskunft über die Abweichung der IST-Werte von den ZIEL-Werten. Die IST-Werte wurden aus der Evaluations-Matrix übertragen. Ebenso wie bei dem CO₂-Vergleich sind diejenigen Fahrzeug-Konfigurationen entfallen, für welche derzeit noch keine verlässlichen IST-Werte veröffentlicht oder nur schwer ableitbar sind.

Ziel/Ist-Vergleich Stickoxid-Emissionen

Fahrzeug-Konfiguration			Beispiel- modell	IST 2006	ZIEL Euro 5 2009	DELTA Euro 5	ZIEL EURO 6 2014	DELTA Euro 6
Antrieb (a)	Kraftstoff (k)	Konfig. (a/k)		NOx [mg/km]	NOx [mg/km]	NOx [mg/km]	NOx [mg/km]	NOx [mg/km]
4-Takt- Hubkolben- motor (1)	Diesel (1)	(1/1)	VW Golf V TDI	191	180	+ 11	80	+ 111
	Benzin (2)	(1/2)	Ford Focus 5T	34	60	- 26	60	- 42
	LPG (3)	(1/3)	Ford Focus 4T	6	60	-54	60	-54
	CNG (5)	(1/5)	Opel Astra Caravan	25	60	-35	60	---35
	GTL (6)	(1/6)	VW Golf V TDI	179	180	-1	80	+99
	BTL (7)	(1/7)	VW Golf V TDI	129	180	-51	80	+49
	RME (8)	(1/8)	VW Golf V TDI	197	180	+17	80	+117
	Pöl (9)	(1/9)	VW Golf V TDI	220	180	+40	80	+140
	Bio-Ethanol (10)	(1/10)	Ford Focus FFV	17	60	-43	60	-43
	Bio-Methanol (11)	(1/11)	VW Golf	186	180	+6	80	+106
	Biogas (12)	(1/12)	Opel Astra Caravan	25	60	-35	60	-35
	LH2 (14)	(1/14)	BMW Hydrogen7	~1-4	60	~-56	60	-56
2-Takt-Hub- motor (2)	Benzin (2)	(2/2)	Trabant P 601L	42	60	-18	60	-18
Wankel- motor (3)	Benzin (2)	(3/2)	Mazda RX-8	11	60	-49	60	-49
Mild Hybrid (5)	Diesel (1)	(5/1)	DC Bluet.- Hybrid	198	180	+18	80	+118
	Benzin (2)	(5/2)	Honda Civic IMA	36	60	-24	60	-24
	GtL (6)	(5/6)	DC Bluet.- Hybrid	186	180	+6	80	+106
	BtL (7)	(5/7)	DC Bluet.- Hybrid	134	180	-46	80	+54
	RME (8)	(5/8)	DC Bluet.- Hybrid	204	180	+24	80	+124
Voll Hybrid (6)	Diesel (1)	(6/1)	Peugeot 307	170	180	-10	80	+90
	Benzin (2)	(6/2)	Toyota Prius II	10	60	-50	60	-50
	Erdgas	(6/5)	Toyota Prius II	5	60	-55	60	-55
	GtL (6)	(6/6)	Peugeot 307	159	180	-21	80	+79
	BtL (7)	(6/7)	Peugeot 307	115	180	-65	80	+35
	RME (8)	(6/8)	Peugeot 307	175	180	-5	80	+95
	Strom (13)	(6/13)	Toyota Prius II	X	60	X	X	X
Batt.-El.- antrieb (7)	Strom (13)	(7/13)	Renault Twingo El.	X	60	-60	60	-60
Brennstoff- zellen- Elektro- antrieb (8)	Bio-Methanol (11)	(8/11)	DC Necar 5	0	60	-60	60	-60
	LH2 (14)	(8/14)	Opel HydroGen	X	60	-60	60	-60
	CGH2 (15)	(8/15)	DC F-Cell	X	60	-60	60	-60

X: keine Emission (Null-Emissions-Fahrzeug)

Abbildung 34, Quelle: eigene Darstellung

Aus Abbildung 34 geht hervor, dass die Einhaltung der aktuellen und kommenden NO_x-Abgasstandards mit ottobasierten Verbrennungsmotoren keine Hürde darstellt. Sowohl mit Benzin (k=2) als auch mit den anderen Ottokraftstoffen, wie Erdgas (k=3), Autogas (k=4), Ethanol (k=10) und Wasserstoff (k=13,14), werden die Vorgaben bei weitem erreicht. Die entsprechenden Beispielmotoren liegen allesamt unter 40 mg/km und damit sogar unter dem ULEV-Wert der kalifornischen Gesetzgebung. Angesichts dieser guten Werte stellt sich allerdings die Frage, warum die künftige europäische Gesetzgebung keine strengeren NO_x-Werte für Ottomotoren vorschreibt.

Die geringen NO_x-Emissionen für die genannten Ottokraftstoffe sind nicht weiter verwunderlich, da diese vom Verbrennungsverfahren und nicht vom Kraftstoff abhängen. Generell gilt für Verbrennungsprozesse, dass mit zunehmender Verbrennungstemperatur und wachsendem Luftanteil im Kraftstoffgemisch die Stickoxidemissionen ansteigen. Der Ottomotor wird möglichst mit einem stöchiometrischen Kraftstoffgemisch ohne Luftüberschuss bei einem λ -Wert von 1 betrieben. Hier kann ein 3-Wege-Katalysator effektiv arbeiten und vergleichsweise einfach und effizient die Stickoxide zu Sauerstoff reduzieren.

Dieselmotoren und direkteinspritzende Benzinmotoren werden hingegen im »Magerbetrieb« betrieben, das heißt mit hohem Luftüberschuss, wodurch der λ -Wert in einem Bereich zwischen 6 bis 10 liegt. Durch den hohen Sauerstoffanteil im Abgas können die Stickoxide nicht reduziert werden und daher ist der 3-Wege-Katalysator für Dieselfahrzeuge ungeeignet. In Dieselmotoren werden »nur« die unverbrannten Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxid (CO) zu Wasser und Kohlendioxid oxidiert. Um die NO_x-Emissionen von Dieselpkw zu verringern, werden hauptsächlich so genannte »innermotorische Maßnahmen« durchgeführt. Hierzu zählen beispielsweise mechanische Optimierungen an der Einspritzdüse und am Kolben, Veränderungen am Einspritzverlauf, ein ausgeklügeltes elektronisches Motormanagement sowie vor allem das Verfahren der Abgasrückführung (kurz AGR). Durch die Rückführung kann der Sauerstoffanteil sowie die Verbrennungstemperatur im Abgas und damit NO_x-Emissionen gesenkt werden – allerdings auf Kosten eines höheren Verbrauchs und erhöhter Partikelemissionen. Jedoch sind mit diesen Maßnahmen, zumindest unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, über Euro 4 hinausgehende Standards nur schwer zu erreichen. Um dem Zielkonflikt auszuweichen und den Forderungen der zukünftigen EU-Emissionsgesetzgebung bzw. den kalifornischen Standards gerecht zu werden, sind spezielle NO_x-Nachbehandlungstechnologien notwendig, wie zum Beispiel NO_x-Speicherkatalysatoren oder SCR-Katalysatoren. SCR steht dabei für »Selective Catalytic Reaction«.

Die mit der Kraftstoffabmagerung verbundene Erhöhung der NO_x-Werte ist an den Beispielmotoren in Abbildung 34 ersichtlich und die Werte der Diesel-Konfigurationen liegen erwartungsgemäß deutlich über den Ottowerten. Mit Diesel (k=1), Bio-Diesel (k=8) und Pflanzenöl (k=9) wird der Euro 5-Wert von 180 mg/km zwar nicht ganz erreicht, aber das Delta ist relativ gering. Bis zum Inkrafttreten von Euro 5 in 2009 dürfte durch eine weitere NO_x-Optimierung des Verbrennungsprozesses und mit Abgasrückführung der Ziel-Wert zu erreichen sein. Bei einer Verwendung von synthetischen Kraftstoffen (k=6,7) wird die 180 mg/km-Marke bereits heute unterschritten. Der auf BtL optimierte Golf TDI erreicht sogar einen Wert von 129 g/km (VW 2005, 8).

Dieser Ziel/Ist-Vergleich zeigt, dass mit den gewählten Beispielmotoren die angestrebten NO_x-Werte der Euro 5-Norm mit konventioneller Motorentechnik und Kraftstoffen sowie

derzeitigen Verfahren der Abgasreinigung zu erreichen ist. Die Messlatte wurde dabei allerdings gerade so hoch gelegt, dass ein Umstieg auf alternative Fahrzeugkonzepte nicht zwingend notwendig ist. Die eigentliche Herausforderung wird erst in der Einhaltung des Euro 6-Wertes liegen, denn mit heutiger Diesel-Motorentechnik sind diese Ziel-Werte nicht zu erreichen. Aber Not macht bekanntlich erfinderisch und die neuen Verfahren zur Dieselreinigung werden von den Automobilherstellern derzeit unter dem stylischen Namen „Bluetec“ propagiert. Hinter dem Begriff verbergen sich die außermotorischen Abgasnachbehandlungsverfahren, also die NO_x-Adsorption in einem Speicherkat oder die Reduktion mit dem SCR-Verfahren. Diese beiden Verfahren lassen sich wie folgt stichpunktartig skizzieren:

Die Grundidee der Adsorption besteht darin, dass die im Magerbetrieb produzierten Stickoxide zwischengespeichert werden, um sie dann in einem »fetten« Regenerationszyklus, in welchem der Motor überstöchiometrisch ($\lambda < 0$) gefahren wird, in reinen Stickstoff zu verwandeln. Im Herbst 2006 brachte DaimlerChrysler den Mercedes E E320 BLUETEC mit einem DeNO_x-Speicherkat auf den amerikanischen Markt. Das Fahrzeug erfüllt die US-Schadstoffnorm BIN-8 und ist damit in 45 der 50 US-Bundesstaaten zugelassen. Die strenger, in den Staaten Kalifornien, New York, Maine, Massachusetts und Vermont geltenden BIN-5 Werte konnten allerdings nicht erreicht werden (auto-presse 2006). Bei VW befindet sich bei den Modellen unterhalb der Passat-Klasse der Speicherkat in der Erprobung. Das Unternehmen plant, den Jetta im Laufe des Jahres 2008 in den USA in allen Staaten einzuführen (auto-reporter 2007)

Aufwändiger, aber noch wirkungsvoller als der Speicherkat ist der SCR-Kat mit AdBlue-Einspritzung. Hinter dem Markennamen verbirgt sich eine wässrige Harnstofflösung, welche in den heißen Abgasstrom eingespritzt wird und sich dabei zu Ammoniak (NH₃) verwandelt. In dem SCR-Katalysator reduziert Ammoniak die unerwünschten Stickoxide chemisch zu harmlosem Stickstoff und Wasserdampf. Die deutschen Autobauer versprechen sich von dem Verfahren, auch mit Oberklassefahrzeugen strengste US-Vorgaben einzuhalten, um damit in allen Bundesstaaten Fuß fassen zu können. Zur Erprobung der »blauen Dieseltechnologien« für den US-Markt haben sich die deutschen Automobilhersteller VW, Audi und DaimlerChrysler zu der so genannten „Bluetec Initiative“ zusammengeschlossen (auto-reporter 2007). Neben den deutschen Deselexperten haben sich auch Honda und Nissan zur Harnstoffeinspritzung bekannt (Focus-Online 2007). Bis 2008 wollen die meisten Hersteller die Technologie serienreif anbieten. Ob die super-sauberen Diesel-Fahrzeuge dann allerdings auch gleich auf dem europäischen Markt zu haben sein werden, dürfte fraglich sein, denn die vergleichsweise »laschen« NO_x-Vorgaben der Euro 5-Norm sind zumindest bei den Klein- und Mittelklassewagen noch ohne AdBlue und Bluetec zu erzielen.

Während das Europäische Parlament die verabschiedete Euro 5-Abgasnorm als Erfolg ansieht, sieht der Verkehrsclub Deutschland (VCD) sie als ungenügend an. „Die Autoindustrie hat es wieder einmal geschafft, Innovationen zugunsten von Umwelt und Gesundheit zu blockieren“, beklagt VCD-Verkehrsreferent Michael Müller (VCD 2006b). Weiter kritisiert er: „In Kalifornien und vielen weiteren Bundesstaaten der USA gelten bereits seit September dieses Jahres strengere Stickoxid-Grenzwerte für Pkw, als die EU für Ende 2014 vorsieht. Während Mercedes auf dem amerikanischen Markt entsprechend saubere Fahrzeuge anbietet, sollen in Europa weiterhin technisch rückständige Autos verkauft werden dürfen“ (ebenda).

Abschließend bleibt festzuhalten, dass Euro 5 im Vergleich zu den US-Abgasnormen als halbherzig und relativ dieselfreundlich anzusehen ist. Um die Werte zu erreichen, sind keine grundlegenden Innovationen in der Abgasreinigung notwendig. Diese werden erst 2014 mit Inkrafttreten von Euro 6 erforderlich sein. Mit Blick auf die im Kapitel 3 entwickelte Innovationstypologie handelt es sich bei den beschriebenen Verfahren der Abgasreinigung, ob nun AGR, Speicher-Kats oder die SCR mit AdBlue, um „Stagnovationen“ (Canzler/Marz 1997), die die fossile Verbrennungsmotorik stabilisieren und nicht transformieren.

Die Hybride-Beispielmodelle oder der Einsatz von Erdgas zeigen jedoch, dass dieser Entwicklungspfad nicht zwangsläufig weiter verfolgt werden muss, sondern dass es durchaus heute schon marktverfügbare Alternativen gibt, bei denen sowohl die NO_x- als auch die CO₂-Vorgaben erreicht werden und dabei gleichzeitig die Ressourcen geschont werden können.

5.3. Partikel

Der dritte Vergleich konzentriert sich auf die Partikelemissionen. Unter Staubpartikel sind in der Hauptsache Rußpartikel mit flüchtigen Kohlenwasserstoffen sowie Schwefel- und Metallrückständen von Kraftstoffen und Motorschmierstoffen zu verstehen.

Staub kann nach der Größe der Partikel unterteilt werden, und zwar in Grobpartikel mit einer Partikelmasse größer 10 µm – kurz als PM₁₀ bezeichnet – und in inhalierbaren Feinstaub mit einer PM kleiner 10 µm. Bei Feinstaub wird weiter unterschieden zwischen lungengängigem Feinstaub (PM_{2.5}) und ultrafeinen Partikeln, deren Durchmesser kleiner als 0,1 µm ist (PM_{0.1}). Noch kleinere Partikel mit einem Durchmesser im Bereich von 1 bis 10 Nanometern werden als Nanopartikel bezeichnet. Dieser »Feinstaub« mit einem Durchmesser kleiner 0,1 Mikrometer wiegt zwar nur einen Bruchteil im Vergleich zu den »großen« Partikeln, steht jedoch im Verdacht, besonders schädlich für die Atemwege zu sein. Prof. Kohler, Präsident der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie, warnt daher: „Die Gesundheitsrisiken durch Feinstaub lassen sich – selbst bei Einhaltung der EU-Grenzwerte – nicht senken, solange die ultrafeinen Staubteilchen nicht speziell untersucht und gemessen werden.“ (Ärzteblatt 2006).

Ein Zusammenhang zwischen kleinen sowie extrem kleinen Partikeln und der steigenden Zahl vorzeitiger Todesfälle aufgrund von kardiovaskulären und Lungenerkrankungen konnte nachgewiesen werden (AECC 2006). Jährlich sterben in der EU schätzungsweise 300.000 Menschen an Krankheiten, die nachweislich durch Staubpartikelchen hervorgerufen wurden (Hartlieb 2006). Nach einem Gutachten von Prof. Wichmann, GSF Neuherberg, sind in Deutschland etwa 10.000 bis 19.000 vorzeitige Todesfälle auf Abgase aus Dieselfahrzeugen zurückzuführen (UBA 2003). Durch die Reduktion der Partikelemissionen, zum Beispiel durch Partikelfilter, ließen sich diese Todesfälle drastisch senken.

In einem Partikelfilter werden die Rußpartikel in einem Keramikfilter gesammelt und in bestimmten Regenerationszyklen, bei kurzzeitig relativ hohen Temperaturen von über 500°C, zu CO₂ verbrannt. Die Regeneration findet abhängig vom Fahrprofil im Zyklus von mehreren hundert Kilometern statt. Üblich bei neuen Fahrzeugen ab Werk ist der Einsatz eines so genannten »geschlossenen« Filtersystems. Dabei handelt es sich meist um Wandstromfilter mit katalytischer Regeneration. Geschlossen Systeme verfügen über einen Partikelrückhaltegrad von mehr als 99% (ADAC 2007c, 1). Durchflussfilter werden als »offene

Filter« bezeichnet und vor allem bei Nachrüstlösungen eingesetzt. Allerdings liegt bei diesem Filtertyp der Partikelrückhaltegrad unter 50% (ebenda).

Die Euro-Abgasgesetzgebung legt Grenzwerte für die Partikel-Emissionen für Dieselfahrzeuge fest. Die Entwicklung des Wertes ist Abbildung 35 zu entnehmen. Der angestrebte Wert von 5 mg/km für Euro 5 und 6 soll auch für direkteinspritzende Benzinmodelle gelten. Die kalifornische LEV-II Gesetzgebung sieht für alle Emissionsklassen einen einheitlichen Wert von 10 mg/mile bzw. 6.2 mg/km vor (vgl. Abbildung 10)

Entwicklung der Partikelemissionen (PM) für Pkw in der EU-Abgasnorm

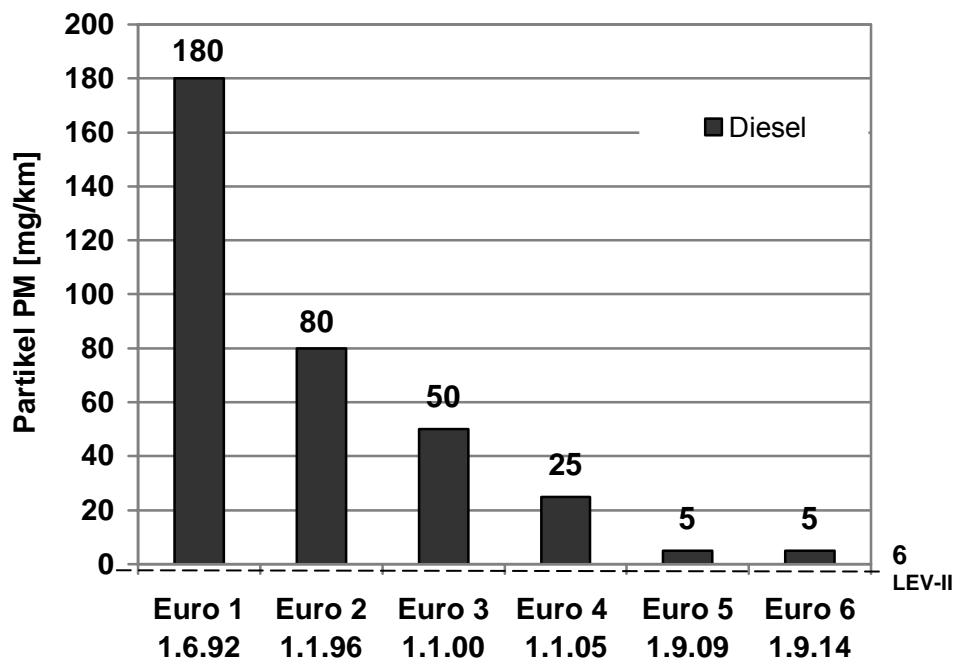


Abbildung 35, Quelle: eigene Darstellung, UBA 2006a, EP 2006

Die Werte in Abbildung 35 stellen die zulässige, gesamte emittierte Partikelmasse dar und unterscheiden nicht weiter zwischen den Anteilen der Partikel-Größen im Abgas. Auch wenn die Partikelmasse seit Euro 1 deutlich gesenkt werden konnte, sagt dieser Wert jedoch nichts über den Feinstaubanteil aus. Daher wurden bereits 1999 von der EU in der so genannten Feinstaub-Richtlinie 99/30/EG (Deutscher Bundestag 2005) Grenzwerte für Feinstaub PM10 bestimmt. Seit dem 1. Januar 2005 gelten die verschärften Grenzwerte der Richtlinie in der EU ohne jede Einschränkung. Danach darf ein Tagesgrenzwert von 50 µg Feinstaub pro m³ nicht öfter als 35 Mal im Jahr überschritten werden. Außerdem sieht die Richtlinie vor, dass der zulässige Jahresmittelwert nicht über 40 µg/m³ liegt (UBA 2007). Im Jahre 2006 überschritten mindestens 66 deutsche Städte die zulässigen Grenzwerte (VCD 2007a), 2005 waren es etwa 30 (NaBu 2006). Spitzenreiter war jeweils die Stuttgart-City. Am »Neckartor« wurden 187 Überschreitungen im Jahr 2005 bzw. 144 im Jahr 2006 gemessen (UBA 2007).

Für die Einhaltung der europäischen Grenzwerte haben die einzelnen EU-Mitgliedstaaten Sorge zu tragen. Bei einer Nichteinhaltung der Grenzwerte hat die EU Sanktionen angedroht. Die Bundesregierung erließ im Oktober 2006 eine Kennzeichenverordnung, die seit

März 2007 gilt (VCD 2007b, 1). Für die Umsetzung sind die Länder verantwortlich. Die Verordnung soll durch eine Einrichtung von Umweltzonen in stark belasteten Gebieten Grenzwertüberschreitungen verhindern. Hierfür werden Pkw, Busse und Lkw entsprechend ihren Schadstoffemissionen in vier Schadstoffgruppen eingeteilt. Fahrzeuge der Schadstoffgruppen 2 bis 4 werden jeweils durch farbige Plaketten (rot, gelb, grün) gekennzeichnet, keine Plaketten erhalten Fahrzeuge der Schadstoffgruppe 1. Zunächst ist es nur Fahrzeugen ohne Plakette untersagt, in eine Umweltzone zu fahren. Nach 2 bis 3 Jahren soll die Regelung allerdings verschärft werden und die Einfahrt nur noch Fahrzeugen der Gruppen 3 bzw. 4 gestattet werden (VCD 2007b,1)

Kennzeichnung von Umweltzonen und Emissions-Plaketten



Abbildung 36, Quelle: VCD 2007b,1

Der ursprüngliche Entwurf der damaligen rot-grünen Regierung sah noch 5 Stufen vor (Müller 2006, 4). Die Zuordnung der Schadstoffgruppen sollte nach den Grenzwertstufen der Euro-Norm erfolgen. Nach diesem Entwurf war eine Plakette für alle Fahrzeuge ab Euro 2 und besser, bis hin zu Euro 5, vorgesehen. Dies bedeutet, dass die höchste Stufe nur noch durch Fahrzeuge mit einem Partikelaustritt kleiner 5 mg/km erzielt wird. Um diesen Wert zu erreichen, ist bei Dieselfahrzeugen ein geschlossener Partikelfilter unumgänglich. Allerdings wurde das Gesetz durch eine Unionsmehrheit im Bundesrat abgeändert und im Mai 2006 in abgeschwächter Form mit nur 4 Stufen genehmigt. Demnach können Dieselfahrzeuge, die zwar Euro 4 erreichen, aber keinen Filter an Bord haben, die beste Schadstoffgruppe erreichen (ebenda, 6).

Der nun folgende Soll-Ist-Vergleich für die Partikelemissionen anhand unserer Beispielmuster ist relativ übersichtlich. Zunächst ist kein Vergleich für die Benzinmuster möglich, da die Euro-Norm keine Partikel-Grenzwerte für Benzinmotorer vorschreibt. Dies erscheint auch nicht notwendig, da bei einem Ottomotor mit geregelterm 3-Wege-Kat und Kaltlaufregler (Standard seit Euro 2) Partikelemissionen keine wesentliche Rolle mehr spielen. Als Zielwerte für die Dieselmuster wurde der aktuell gültige Euro 4-Wert von 25 mg/km und der Euro 5- bzw. 6-Wert von 5 mg/km gewählt. Die IST-Werte wurden, wie auch bei den anderen

Vergleichen, aus der Evaluations-Matrix übertragen. Fahrzeug-Konfigurationen, für welche keine Werte recherchierbar waren, wurden ausgeblendet.

Ziel/Ist-Vergleich Partikel-Emissionen

Fahrzeug-Konfiguration			Beispielmodell	IST 2006	ZIEL Euro 4 2005	DELTA Euro 4	ZIEL EURO 5 2009	DELTA Euro 5
Antrieb (a)	Kraftstoff (k)	Konfig (a/k)		PM [mg/km]	PM [mg/km]	PM [mg/km]	PM [mg/km]	PM [mg/km]
4 Takt-Hubkolbenmotor (1)	Diesel (1)	(1/1)	VW Golf V TDI	19	25	-6	5	+ 14
	GTL (6)	(1/6)	VW Golf V TDI	14	25	-9	5	+9
	BTL (7)	(1/7)	VW Golf V TDI	17	25	-8	5	+12
	RME (8)	(1/8)	VW Golf V TDI	11	25	-14	5	+6
	Pöl (9)	(1/9)	VW Golf V TDI	10	25	-15	5	+5
Mild Hybrid (5)	Diesel (1)	(5/1)	DC Bluet.-Hybrid	(3)*	25	-22	5	-2
	GtL (6)	(5/6)	DC Bluet.-Hybrid	(2)	25	-23	5	-3
	BtL(7)	(5/7)	DC Bluet.-Hybrid	(3)	25	-22	5	-2
	RME (8)	(5/8)	DC Bluet.-Hybrid	(2)	25	-23	5	-3
Voll Hybrid (6)	Diesel (1)	(6/1)	Peugeot 307	22 (1)	25	-3 (-24)	5	+17 (-4)
	GtL (6)	(6/6)	Peugeot 307	16 (1)	25	-9 (-24)	5	+11 (-4)
	BtL(7)	(6/7)	Peugeot 307	20 (1)	25	-5 (-24)	5	+15 (-4)
	RME (8)	(6/8)	Peugeot 307	13 (1)	25	-8 (-24)	5	+8 (-4)
Batt.-El.-antrieb (7)	Strom (13)	(7/13)	Renault Twingo El.	X	25	X	5	X
Brennstoffzellen-Elektroantrieb (8)	Bio-Methanol (11)	(8/11)	DC Necar 5	0	25	x	5	X
	LH2 (14)	(8/14)	Opel HydroGen 3	X	25	x	5	X
	CGH2 (15)	(8/15)	DC F-Cell	X	25	x	5	X

X: keine Emission (Null-Emissions-Fahrzeug)

*() Werte mit Diesel-Partikelfilter

Abbildung 37, Quelle: eigene Darstellung

Interessant ist, dass alle hier aufgeführten Beispielmotoren auch ohne den Partikelfilter den Euro 4-Grenzwert erreichen. Zum Zeitpunkt der Annahme von Euro 4 ging man noch davon aus, dass die Einhaltung der Vorschriften zwangsläufig den Einbau kostspieliger Rußpartikelfilter in Dieselfahrzeugen erforderlich machen würde. Doch durch die Fortschritte im Bereich der Motorentechnik wurde ein besonderer Filter überflüssig (EurActiv 2006), zumindest für Klein- und Mittelklassewagen.

Bei Fahrzeugen mit einer stärkeren Motorisierung wird es allerdings zunehmend schwieriger den Grenzwert einzuhalten. Beispielsweise ist der Golf V TDI mit einem 2-Liter-Motor und einer Leistung von 125 kW nur mit Dieselpartikelfilter erhältlich. Mit diesem betragen seine Partikel-Emissionen nur noch 2 mg/km und er erfüllt damit die Partikel-Vorgaben von

Euro 5 und 6 (KBA 2005). Es zeigt sich also, dass mit heutiger Motorentechnik die künftigen Euro 5- und 6-Werte nur mit dem Partikelfilter zu erreichen sind. Euro 4 kann je nach Fahrzeugdimensionierung auch noch ohne Filter eingehalten werden.

Aufgrund der strengen Partikel-Grenzwerte in den USA und der Fahrzeugdimensionierung wird für eine Zulassung des Bluetec Hybrid ein Partikelfilter notwendig sein. Der Peugeot 307 hingegen kann auch ohne Filter noch die Euro 4 einhalten, daher haben wir für den Peugeot beide Werte, mit und ohne Filter, in Abbildung 37 aufgeführt. Die Emissions-Angaben beider Fahrzeuge beruhen auf KBA-Werten von vergleichbaren, nicht-hybridisierten Modellen.

5.4. Ökologischer Gesamtvergleich

Abschließend wollen wir zwei ökologische Gesamtvergleiche durchführen.

In dem ersten Vergleich werden die in den drei Ziel-/Ist-Vergleichen diskutierten Emissionen – also CO₂, NO_x und die Partikelemissionen – um Kohlenmonoxid (CO) und die unverbrannten Kohlenwasserstoffketten (HC) ergänzt und in Form einer Netzdarstellung visualisiert. Diese erste ökologische Gesamtschau umfasst damit alle in der Euro-Norm reglementierten Emissionen sowie Kohlendioxid als Parameter und ist in Abbildung 38 dargestellt.

Ökologischer Gesamtvergleich ausgewählter Beispielmmodelle (Netzdiagramm)

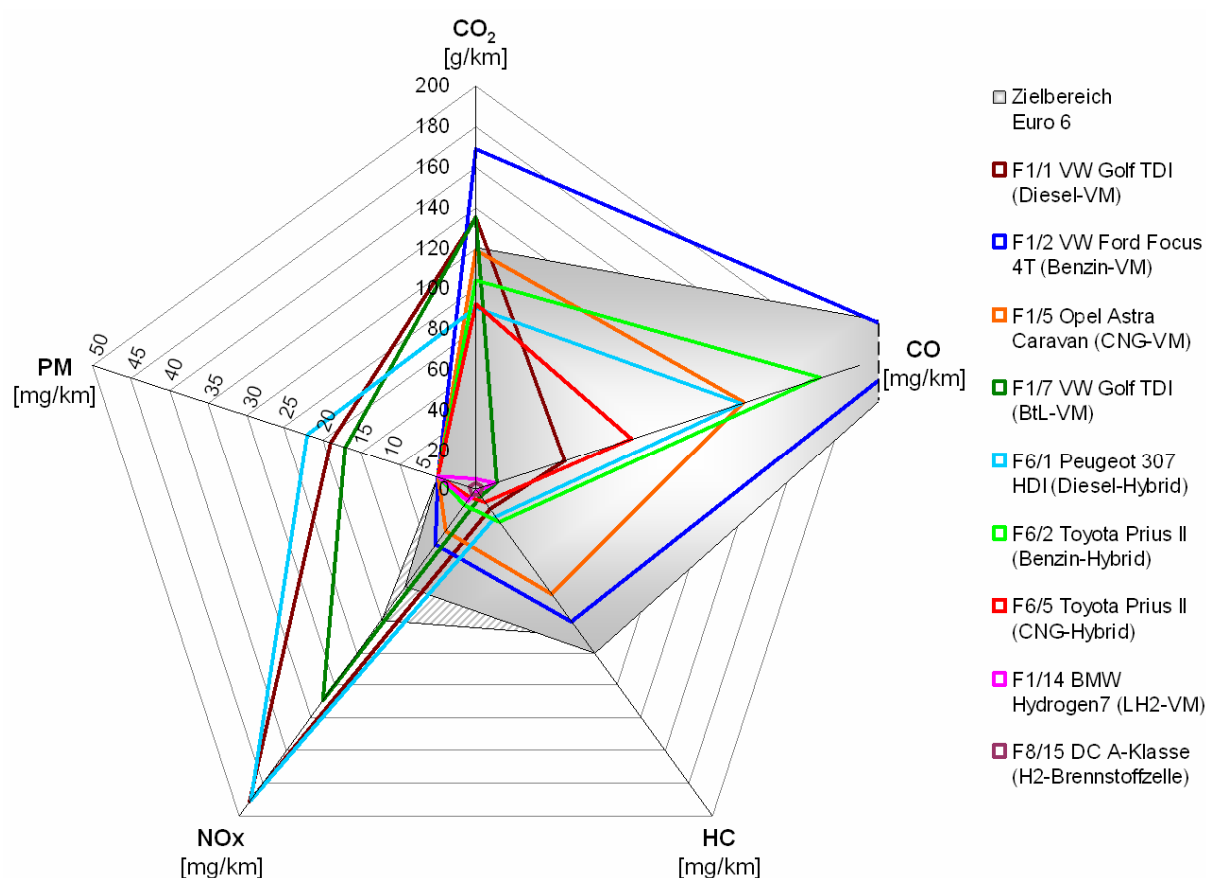


Abbildung 38, Quelle: eigene Darstellung

Für jedes der dargestellten Beispielmotore ergibt sich ein charakteristischer Linienzug in dem Netzdiagramm. Den von uns definierten Zielbereich stellt die grau-hinterlegte Fläche dar. Sie wird aufgespannt durch die ab 2014 geltenden Euro 6 Emissionsvorgaben sowie durch das CO₂-Minderungsziel von 120 mg/km bis 2012. Abgesehen von leichten Abweichungen sind die künftigen Euro 6-Werte für Diesel-Pkw an die strengerer Ottowerte angepasst, so dass der Diesel- und der Otto-Zielbereich fast deckungsgleich sind. Diesel-Abweichungen sind an der grau schraffierten Flächendarstellung zu erkennen. Liegt nun der Linienzug eines Beispielmotors innerhalb der Fläche, so erfüllt das Fahrzeug bereits heute die zukünftigen Anforderungen der EU und das Fahrzeugkonzept kann als zukunftstauglich bezeichnet werden. Die Darstellung zeigt, dass dies für das Erdgas-Fahrzeug (F_{1/5}) sowie für den Benzin- und Erdgas-Hybriden der Fall ist. Exemplarisch für jegliche Elektrofahrzeuge ist die Brennstoffzellen-A-Klasse von DaimlerChrysler dargestellt. Elektrisch angetriebene Fahrzeuge sind in unserem »Tank to Wheel-Ansatz« als Nullemissionsfahrzeuge anzusehen und bilden damit keinen Linienzug, sondern einen Punkt. Sie stellen also den Idealfall dar. In ähnlicher Weise sind die Emissionen des Wasserstoff-Verbrennungsmotors (F_{1/14}) vernachlässigbar und damit kaum darstellbar.

Alle anderen Modelle erfüllen die Vorgaben des Zielbereichs nicht und die Linienzüge ragen aus dem Zielbereich heraus. Vor allem im Bereich der Stickoxide und der CO₂-Emissionen muss die Automobilindustrie in den kommenden Jahren Maßnahmen treffen, um die Anforderungen der Gesetzgebung zu erfüllen. Die CO- und HC-Vorgaben hingegen werden bereits heute von allen gewählten Beispielmotoren erfüllt. Durch Standardtechnologie wie dem geregelten 3-Wege Kat beim Ottomotor bzw. Oxidationskatalysatoren bei Dieselmotoren werden die Werte problemlos eingehalten. Daher erschien dem Gesetzgeber eine weitere Verschärfung der Grenzwerte nicht nötig und die Euro 5- und Euro 6-Vorgaben bewegen sich für CO und HC im Bereich der derzeit gültigen Euro 4-Werte.

Aus diesem Grund konzentrieren auch wir uns im Weiteren auf die »brisanten« Stickoxid- und Partikelemissionen sowie auf den CO₂-Ausstoß und blenden in der nun folgenden Abbildung 39 die CO- und HC-Achsen aus. Als Darstellungsform wurde ein so genanntes »Blasendiagramm« gewählt. Auf der y-Achse sind der Kohlendioxid-Ausstoß, auf der x-Achse die Stickoxidemissionen der Beispielmotore aufgetragen. Jede Blase in dem Diagramm repräsentiert dabei ein Beispielmotore. Der Durchmesser einer Blase ist ein Maß für den Partikel-ausstoß. Je größer eine Blase ist, desto höher ist der Ausstoß.

Ökologischer Gesamtvergleich ausgewählter Beispielmotore (Blasendiagramm)

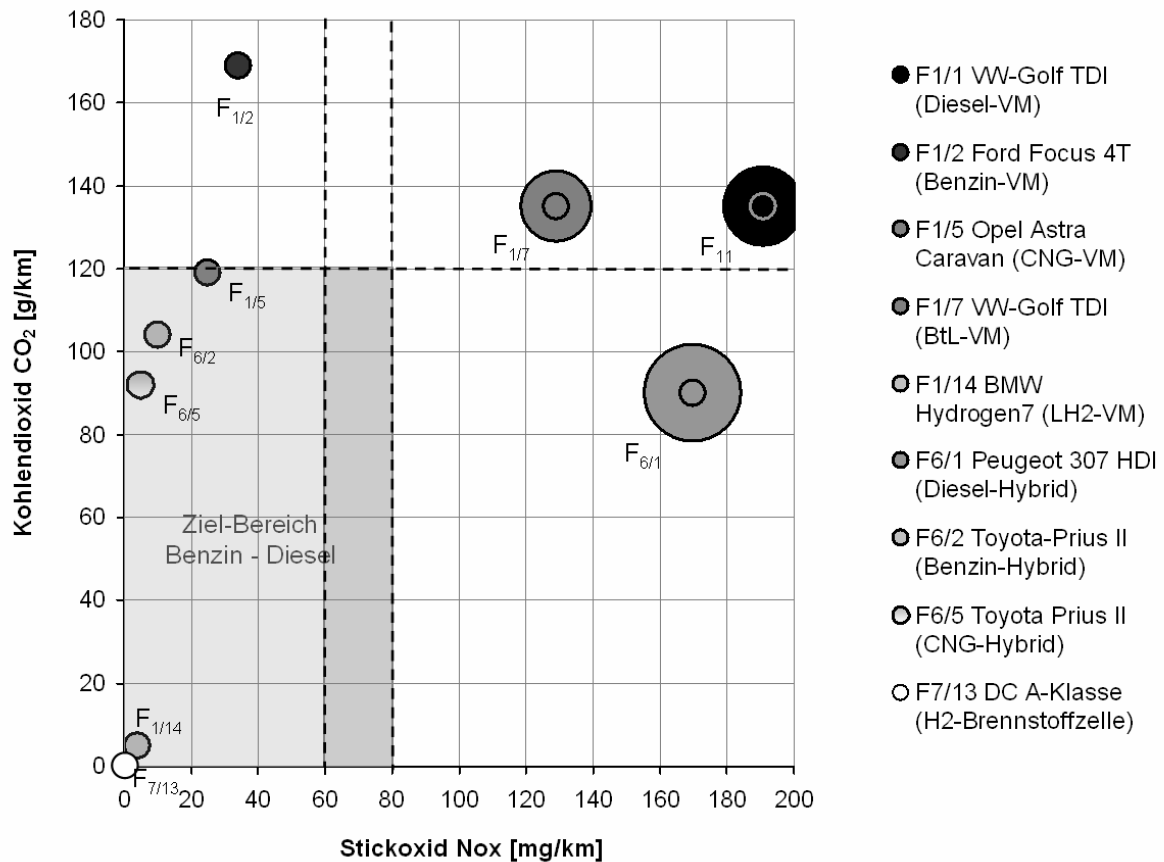


Abbildung 39, Quelle: eigene Darstellung

Anhand der Abbildung ist zu erkennen, welches Beispielmotorell sich in dem von uns definierten Zielbereich befindet und welches nicht. Ähnlich wie in Abbildung 38 wird der Zielbereich aus den beiden Ziel-Größen »Ziel 2012« für CO₂ und »Ziel Euro 6 2015« für NOx aufgespannt. Um in den Zielkorridor zu gelangen, darf ein Beispielmotorell demnach nicht mehr als 120 g CO₂ pro km ausstoßen und gleichzeitig müssen die Stickoxidemissionen Euro 6-konform sein, also unter 80 mg/km für Dieselfahrzeuge bzw. unter 60 mg/km für Benziner liegen. Blasen in diesem EU- Zielbereich stellen damit zukunftsweisende Beispielmotorelle dar, welche bereits heute die künftigen Anforderungen des Gesetzgebers erfüllen.

Ein drittes Kriterium, um im Zielbereich »landen« zu können, ist ein Partikelaustritt kleiner 5 mg/km. Es wurde bereits dargestellt, dass die Partikelemissionen für Benziner unbedenklich sind und von Werten von unter 5 mg/km ausgegangen werden kann. Daher sind die Blasen für die Benzinmodelle allesamt gleichgroß dargestellt. Ohne Dieselpartikelfilter ist es für Dieselfahrzeuge hingegen nicht möglich die Euro 5 - bzw. 6-Werte von 5 mg/km zu erreichen. Die höheren Partikelemissionen der Dieselmotorelle sind an den größeren Blasen zu erkennen. Die kleineren Blasen innerhalb einer »Diesel-Blase« sollen andeuten, dass über einen Partikelfilter die Partikelemissionen des Dieselmotors auf ein Maß des Ottomotors, also unter 5 mg/km, reduziert werden können.

In der Blasendarstellung ist der Zielkonflikt zwischen Kohlendioxid- und Stickoxidminderung leicht zu erkennen. Die Diesel-Blase F_{1/2} zeigt, dass durch Dieselmotorechnologie zwar der

CO₂-Ausstoß um ca. 10% gegenüber dem Otto-Modell ($F_{1/1}$) gesenkt werden kann, allerdings auf Kosten deutlich höherer Stickoxid- und Partikelemissionen. Durch den Einsatz von synthetischen Dieseleratzkraftstoffen ($F_{1/7}$) können diese reduziert werden, allerdings nicht auf ein Maß, um in den Zielbereich zu gelangen. Hierfür sind die bereits diskutierten NO_x-Abgasreinigungsverfahren notwendig. Ohne Partikelfilter und Abgasnachbehandlung hat der Diesel also keine Chance, in den Zielbereich zu gelangen. Neben den Mehrkosten haben allerdings die Abgasreinigungsverfahren den Nachteil, dass sie einen Sprit-Mehrverbrauch zu Folge haben. Und dieser erhöht wiederum die CO₂-Emissionen. In Abbildung 40 ist der Mehrverbrauch durch die aus Euro 3 und Euro 4 resultierenden Umweltmaßnahmen quantifiziert. Zusätzlich führen die seit 1998 für die Autobauer verbindlichen Sicherheitsanforderungen des EuroNCAP (European New Car Assessment Programme) zu einem gewichtsbedingten Mehrverbrauch in Automobilen.

Mehrverbrauch durch regulatorische Maßnahmen

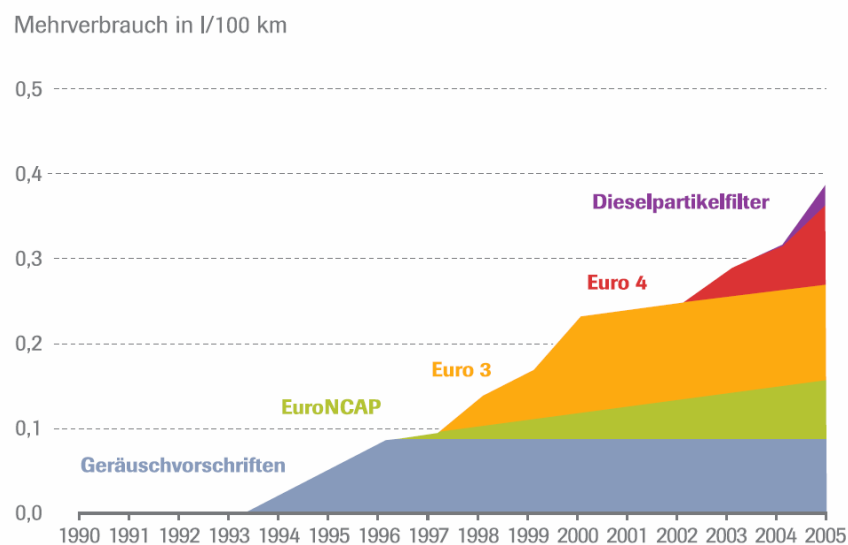


Abbildung 40, Quelle: VDA 2007,12

Wie kann also dieses »Otto-Diesel-Dilemma« gelöst werden? Eine Möglichkeit stellt der Einsatz von Erdgas dar. Erdgas verbrennt sauberer als Benzin und hat gleichzeitig bis zu 25% (VDA 2006, 121) geringere CO₂-Emissionen im Vergleich zu Benzin. Die CO₂-Emissionen des Erdgas-Opel Astra Caravan ($F_{1/5}$) liegen zum Beispiel bei 119 g/km und damit um mehr als 20% unter dem Wert des Benziner-Golfes ($F_{1/1}$). Damit erreicht das Fahrzeug den Zielbereich.

Eine zweite Möglichkeit stellt die Hybridisierung von Ottomotoren dar. Der Toyota-Prius unterschreitet die 120 g/km-Marke deutlich, sowohl in der Benzin- ($F_{6/2}$) als auch in der Erdgas-Ausführung ($F_{6/5}$).

Bei dem Peugeot 307 ($F_{6/1}$) handelt es sich um einen Diesel-Hybriden, dieser kommt zwar auf den hervorragenden CO₂-Wert von 90 g/km, allerdings mit dem Nachteil der dieselbedingten höheren Schadstoffemissionen. Um trotzdem in den Zielbereich zu gelangen, muss das Fahrzeug mit einem Partikelfilter sowie einer NO_x-Nachbehandlung ausgerüstet

werden, was ihn wirtschaftlich unattraktiv macht. In Abbildung 41 wurde eine Kostenabschätzung für einen »saubereren« Diesel-Hybriden vorgenommen. Die Mehrkosten im Vergleich zu einem nicht-hybridisierten Ottomodell liegen unserer Abschätzung zur Folge derzeit bei ca. 8.000 EUR.

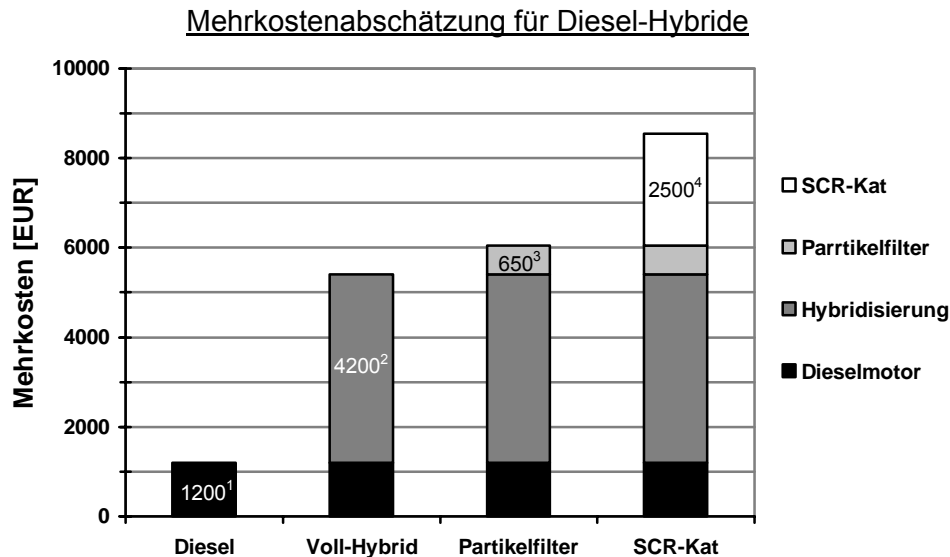


Abbildung 41, Quelle: eigene Darstellung; ¹McKinsey 2006, 32; ²McKinsey 2006, 39; ³Handelsblatt 2007; ⁴DowJones Nenswire 2006

Es sei darauf hingewiesen, dass die Angaben in der Abbildung nicht als fixe Werte anzusehen sind und aus verschiedenen Quellen stammen. Beispielsweise beziehen sich die Mehrkosten von 2.500 EUR für einen SCR-Kat auf den Oberklassen-Pkw E320 Bluetec von Mercedes (DowJones 2006). Die Mehrkosten für die Voll-Hybridisierung beziehen sich hingegen auf ein Mittelklasse-Fahrzeug mit einem 55 kW-Verbrennungsmotor und einem 25 kW-Elektromotor (McKinsey 2006,39). Für andere Fahrzeuge können die Mehrkosten durchaus niedriger oder höher ausfallen. Als Richtgröße sind die Angaben jedoch zunächst ausreichend. Sie verdeutlichen sehr anschaulich die Mehrkostenproblematik bei Dieselkonzepten.

Zu beachten ist ferner, dass bei einer weiteren Diffusion der Hybrid-Technologie verstärkt Skalierungseffekte greifen. Bis 2020 können nach Berechnungen von McKinsey die Mehrkosten für eine Vollhybridisierung um ca. 50% auf 2.000 EUR gesenkt werden (McKinsey 2006, 39). Auch die im LKW-Bereich bereits bewährte SCR-Technologie wird bei steigendem zusätzlichem Absatz im Pkw-Bereich noch deutlich günstiger werden. Nicht zu vergessen sind auch politische Förderinstrumente oder Steuerbegünstigungen für Dieselmotoren, die Diesel-Hybride finanziell attraktiver machen können.

Bei einem Erdgas-Hybriden stellt sich ebenfalls das Mehrkosten-Problem. Hier kommen zu der Hybridisierung noch zusätzliche Kosten im Bereich von 1.500 bis 3.500 Euro (Erdgasfahrzeuge 2006) hinzu. Dafür kann der günstigere Ottomotor eingesetzt werden und es ist keine aufwändige Abgasnachbehandlung notwendig. Unter dem Strich belaufen sich die Mehrkosten von Diesel- und Erdgas-Hybriden in der Anschaffung auf einen ähnlichen Wert. Aufgrund des günstigeren Erdgaspreises wird sich allerdings die Erdgasvariante schneller

amortisieren können. Erdgas wird an der Tankstelle für ca. 60 Cent pro Liter Benzinäquivalent angeboten.

Ähnlich wie in der Netzdarstellung repräsentiert die wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-A-Klasse ($F_{8/15}$) den Idealfall eines Null-Emissions-Autos. Der Wasserstoffmotor ($F_{1/14}$) kommt diesem Idealfall sehr nahe, jedoch entstehen, wie in Kapitel 4.2 bereits erläutert, geringfügige Mengen NO_x durch den Stickstoffanteil der Verbrennungsluft sowie minimale Mengen an Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen durch die Verbrennung von Schmieröl.

Nicht zu vergessen ist die Tatsache, dass die Verbrauchsoptimierung des Ottomotors ihn in den nächsten Jahren keinesfalls günstiger, sondern eher teurer machen wird. Die Grundfrage des kommenden Jahrzehnts wird nicht lauten, ob Otto oder Diesel das Rennen macht, sondern vielmehr die Frage, ob nicht eine radikale Antriebs- oder Kraftstoffalternative letztlich die ökonomisch und ökologisch nachhaltigere Lösung darstellt. Ob dies nun der Einsatz von Wasserstoff im Verbrennungsmotor beziehungsweise in der Brennstoffzelle oder der Batterie-Elektroantrieb ist, ist offen. Alle drei Varianten können als lokal emissionsfrei angesehen werden und haben im Falle einer regenerativen Strom- bzw. Wasserstofferzeugung das Potenzial CO_2 -neutral zu sein.

6. Fazit: Bilanz und Agenda

In der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch unternommen, das breit gefächerte Feld antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen aus einer interdisziplinären Perspektive zu systematisieren und zu evaluieren. Im Zentrum stand dabei die Entwicklung einer Evaluations-Matrix. Mit dieser Matrix wurden zwei Ziele verfolgt. Erstens sollten die Innovationen mit Hilfe technischer, ökonomischer und ökologischer Parameter quantifiziert werden. Aufbauend darauf wurden diese Innovationen dann zweitens im Hinblick auf die Erreichung geltender und geplanter Zielvorgaben miteinander verglichen und bewertet.

Das Fazit dieser Analyse wird nun in diesem abschließenden Kapitel in zwei Schritten gezogen: In einem ersten Schritt werden zunächst die Hauptergebnisse der Untersuchung in komprimierter Form bilanziert. Ausgehend davon wird dann in einem zweiten Schritt eine stichpunktartige Agenda für weiterführende Evaluationen antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen skizziert.

Bilanz

Das Automobil ist mit Abstand der Verkehrsträger Nummer 1: Ungefähr 90% aller Personenkilometer, die mit einem Verkehrsmittel zurückgelegt werden, entfallen auf das Auto (PGM 2004, 9). Doch das Auto ist weit mehr als ein bloßes Fortbewegungsmittel. Es ist paradigmatisches Produkt und integraler Bestandteil der fossilen Mobilitätsgesellschaft. Das Automobil gilt als Symbol für Status, Wohlstand, (Bewegungs-)Freiheit, Dynamik und Fortschritt der Moderne.

Und genau in dieser Doppelseigenschaft als Paradigma und Symbol wird das Auto auch in den aufstrebenden Wachstumsgesellschaften wahrgenommen, wie etwa in China, wo es

sowohl als individuelles Statussymbol als auch als Beweis für die Modernität der Gesellschaft gefeiert wird.

Alle Versuche, die Dominanz des Automobils zu brechen, sind bislang mehr oder weniger gescheitert. Einer der Gründe für diese Ultrastabilität des Automobils liegt in dessen hartem technischen Kern. Er besteht in einer Verbrennungsmotorik, die fossile Brennstoffe, vor allem Öl, aus der Natur importiert und dann Schadstoffe wie Stickoxide; Kohlenwasserstoffe und Partikel sowie die Treibhausgase Kohlendioxid und Methan in die Natur exportiert.

Die F&E-Arbeit der Automobilindustrie ist nach wie vor auf die Optimierung dieser Konvention fokussiert. Die Verbesserung und Stabilisierung der konventionellen Verbrennungsmotorik dominiert die Innovationsprozesse in der Automobilindustrie. Sie war und ist Hauptausgangspunkt und -ziel dieser Prozesse.

Aus innovationstheoretischer Perspektive handelt es sich hierbei um eine Hyperselektion: Die fossile Verbrennungsmotorik bildet den herrschenden Stand der automobilen Technik. Sie dominiert die antriebs- und kraftstofftechnologischen Innovationsprozesse. Ihre Optimierung stabilisiert und verstärkt diese Dominanz, was wiederum dazu führt, dass alle anderen vorhandenen und potenziellen Alternativtechnologien im Keim erstickt, blockiert oder verzögert werden.

Die Hyperselektion der konventionellen Verbrennungsmotorik wird zunehmend problematisch und gerät in wachsendem Maße unter Innovationsdruck. Dieser Innovationsdruck erwächst zunächst aus drei Problemfeldern, und zwar der Verfügbarkeit und dem Preis fossiler Brennstoffe, der gesellschaftlichen Bedeutung des Automobils sowie den Schadstoffemissionen und deren Folgen. Die Entwicklungen in diesen drei Problemfeldern führten in Europa und den USA, speziell in Kalifornien, zu innovationsfördernden gesetzlichen Regelungen und Normierungen, die eine antriebs- und kraftstofftechnologische Substitution der konventionellen Verbrennungsmotorik begünstigen und strategisch erzwingen können.

Der Innovationsdruck und die gesetzlichen Regelungen und Normierungen, in denen dieser Druck juristisch verarbeitet und verdichtet wurde, führten dazu, dass im letzten Jahrzehnt weltweit eine Vielzahl von Innovationen in Angriff genommen wurde, um die fossile Verbrennungsmotorik nicht nur zu optimieren, sondern auch zu substituieren.

Dieses breit gefächerte Feld antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen wurde in der vorliegenden Arbeit zunächst in Form einer Innovations-Matrix systematisiert, geclustert und qualitativ bewertet. Aus dieser qualitativen Innovations-Matrix wurde dann eine Evaluations-Matrix abgeleitet, die es ermöglichte, die zuvor identifizierten innovativen Fahrzeug-Konfigurationen nach technischen, ökonomischen, ökologischen und anderen Kenngrößen zu quantifizieren, die einen direkten detaillierten Vergleich unterschiedlicher Fahrzeug-Konfigurationen sowie eine daraus abgeleitete Evaluation der unterschiedlichen Innovationen gestatten.

Sowohl die in der Evaluations-Matrix quantifizierten Fahrzeug-Typen als auch die dazu herangezogenen Kenngrößen tragen – das sei an dieser Stelle nochmals ausdrücklich betont – lediglich Beispielcharakter. Die Auswahl anderer Typen und Kenngrößen ist nicht nur denkbar, sondern notwendig. Die hier vorgestellten Innovations- und Evaluations-Matrizen verstehen sich als ein Versuch zur qualitativen und quantitativen Bewertung antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen. Sie sollen sowohl Experten-Diskussion als auch öffentliche Debatten initiieren und unterstützen.

Bei der Erhebung der Daten erwies sich eine durchgängige und hundertprozentig vergleichbare Quantifizierung der Kenngrößen nicht nur als ausgesprochen schwierig, sondern gegenwärtig auch als unmöglich. Wie in anderen Mobilitätsstatistiken gibt es auch hier keine solide und belastbare Datengrundlage. Viele Kennwerte ließen sich nicht einfach aus einer oder mehreren Datenbanken zusammenstellen oder durch ausgedehnte Recherchen ermitteln, sondern mussten durch eigene technische, physikalische und chemische Überlegungen berechnet werden. Jeder Vorschlag zur Komplettierung und Qualifizierung der in der Evaluations-Matrix verwendeten Daten ist deshalb willkommen. Es ist nicht zuletzt Sinn und Zweck des vorliegenden Discussion Papers zu einer solchen Komplettierung und Qualifizierung einzuladen und anzuregen.

Die Evaluations-Matrix und der daraus entwickelte und im Kapitel 5.4 vorgestellte Gesamtvergleich machten ein Problem deutlich, das sich zu- und auch etwas überspitzt vielleicht am besten als »Reduktions- und Prothesen-Innovationen« bezeichnen und stichpunktartig wie folgt beschreiben ließe:

- Um den harten technischen Kern der fossilen Automatisierung, die klassische Verbrennungsmotorik, ökologisch zu optimieren, werden zwei Hauptpfade beschritten, und zwar ein Input- und ein Output-Weg. Der Input-Weg ist darauf fokussiert, durch unterschiedlichste technische Maßnahmen den Verbrauch an fossilen Kraftstoffen zu reduzieren. Der Output-Weg ist darauf gerichtet, den Schadstoffausstoß des Verbrennungsmotors zu reduzieren.
- Diese doppelte Reduktion wird technologisch und ökonomisch zunehmend aufwändiger. Jeder Prozentpunkt Reduktion erfordert immer größere technische und ökonomische Mittel. Oder, etwas salopp gesagt: Jeder weitere Schritt bei der ökologischen Optimierung des Verbrennungsmotors bedarf ständig wachsender vor- und nachgelagerter Technologie-Prothesen, die die strukturelle ökologische Schwäche der fossilen Motorik minimieren.
- Die Verbesserung und Stabilisierung des konventionellen Verbrennungsmotors konzentriert sich im wachsenden Maße auf die Entwicklung immer neuerer und ausgefeilterer Reduktions- und Prothesen-Technologien. Isoliert, für sich betrachtet, ist jede dieser Reduktions- und Prothesen-Technologien, die die fossile Verbrennungsmotorik am Laufen halten, hochgradig innovativ. Systemisch betrachtet sind sie es nicht, weil sie die fossile Konvention stabilisieren und nicht transformieren.
- Diese sich um den klassischen Verbrennungsmotor rankenden unterschiedlichen Prothesen-Technologien stehen nicht nur in einem Ergänzungs-, sondern auch in einem Widerspruchs- und Ausschlussverhältnis. Dies machte das »Otto-Diesel-Dilemma« sehr anschaulich deutlich. Auswege aus derartigen Dilemmata stimulieren und erfordern die Entwicklung weiterer Reduktions- und Prothesen-Technologien.

Dieser Entwicklungspfad der Reduktions- und Prothesen-Innovationen ist janusköpfig und besitzt eine fatale Eigenlogik. Er ist janusköpfig, weil einerseits jeder Schritt bei der Reduktion fossiler Kraftstoffe und umweltbelastender Schadstoffe dringend notwendig ist, andererseits jedoch die Prothesen-Innovationen die fossile Verbrennungsmotorik stabilisieren. Er besitzt eine fatale Eigenlogik, da auf diesem Entwicklungspfad tendenziell keine technischen

Lösungen aus »einem Guss« entstehen, sondern technologische Konglomerate, sich wechselseitig stützender Hilfs- und Teil-Lösungen.

Agenda

In der vorliegenden Untersuchung wurde explizit und implizit immer wieder darauf hingewiesen, dass die hier exemplarisch vorgestellte Evaluations-Matrix keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder Endgültigkeit erhebt. Sowohl eine Weiterentwicklung ihrer Struktur als auch eine systematische Validierung der Daten sind nicht nur möglich, sondern auch zwingend notwendig. Dabei stehen insbesondere folgende sieben Schwerpunkte im Mittelpunkt der weiteren Arbeit:

1. *Die Modifizierung der Evaluations-Matrix.* Die hier zur Diskussion gestellte Matrix trägt prototypischen Charakter. Sie lässt sich sowohl im Hinblick auf die Fahrzeug-Konfigurationen und Beispielmuster als auch in Bezug auf die Evaluationsbereiche und -kennziffern nach unterschiedlichen innovationspraktischen und -theoretischen Bedürfnissen modifizieren. Dabei wäre es denkbar und wünschenswert, dass derartige Modifikationen von beiden Seiten, den Theoretikern und Praktikern, entwickelt werden, und zwar so, dass die Evaluations-Matrix nicht nur als Analyse-Instrument, sondern auch als Kommunikations-Tool verwendet werden kann.
2. *Die Qualifizierung der Daten.* Das hier erarbeitete und vorgestellte Daten-Set der Evaluations-Matrix stellt einen Rohentwurf dar. Dieses Set muss komplettiert und qualifiziert werden. Dabei geht es insbesondere darum, die Validität und Kohärenz der Datenbasis schrittweise zu verbessern und damit die Vergleichbarkeit zu erhöhen. Dies betrifft insbesondere die Kennwerte jener Fahrzeug-Konfigurationen, die sich gegenwärtig noch in der Prototypen- oder Kleinserien-Entwicklung befinden.
3. *Die laufende Aktualisierung der Evaluations-Matrix.* Das ebenso breit gefächerte wie tief gestaffelte Feld der antriebs- und kraftstofftechnologischen Innovationen ist nicht nur hoch dynamisch, sondern auch durch jähe Wenden (Stichwort Hybrid-Antriebe) gekennzeichnet. Mit wachsendem Innovations-Druck werden sowohl die Dynamik als auch plötzliche Richtungswechsel von Innovationsprozessen zunehmen. Eine permanente Aktualisierung der vorgestellten oder entsprechend modifizierten Matrizen ist deshalb unumgänglich.
4. *Die Ergänzung der Analyse.* Die vorliegende Quantifizierung antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen konzentrierte sich auf das Auto. Andere Fahrzeugtypen, wie Busse, Lastkraftwagen, Motorräder, Mopeds, Gabelstapler usw., wurden dabei nur am Rande oder gar nicht betrachtet. Da diese und andere Fahrzeugtypen sowohl im Rahmen der gesellschaftlichen Mobilität insgesamt als auch im Hinblick auf die Etablierung und Durchsetzung von Nischen-Innovationen eine wichtige Rolle spielen, sind sie bei einer weiterführenden Analyse unbedingt zu beachten.
5. *Der Ausbau des Rankings.* Die beiden Ranking-Parameter der Evaluations-Matrix tragen lediglich Beispielcharakter und illustrieren das Ranking-Potenzial der Matrix. Mit der zuvor skizzierten Qualifizierung der Datenbasis erhöhen sich sowohl die Ranking-Möglichkeiten als auch die Aussagefähigkeit der Rankings. Die hier modellhaft entwickelte Evaluations-Matrix gestattet unterschiedliche Rankings und Ranking-Vergleiche, insbesondere auch solche, die auf den Stellenwert sozial erworbener und praktizierter Fahrstile und Mobilitätsprofile sowie deren ökologische Folgen fokussiert sind.
6. *Die Analyse und Diskussion der Reduktions- und Prothesen-Innovationen.* Zum einen geht es dabei darum, die zwiespältige Charakteristik und Eigenlogik dieses Entwicklungspfades an Hand laufender und geplanter Forschungs- und Entwicklungsprojekte detaillierter und differenzierter zu untersuchen. Im Zentrum steht hier das Verhältnis von partieller Innovation und systemischer Stagnation. Zum anderen kommt es darauf

an, diesen Innovationspfad mit anderen Pfaden, insbesondere mit radikalen Innovationen ersten und zweiten Grades ins Verhältnis zu setzen. Im Mittelpunkt steht hierbei ein komplexer Potenzial-Vergleich zwischen konventionellen und radikalen Innovationen.

7. *Die Erhöhung der Reichweite der Evaluations-Matrix.* Trotz ihrer Komplexität hat die hier vorgestellte und diskutierte Evaluations-Matrix noch eine relativ eingeschränkte Reichweite. Sie basiert auf »Tank-to-Wheel«-Betrachtungen. Gerade im Hinblick auf die Innovationen zweiten Grades wäre es notwendig, diese Betrachtungen schrittweise und systematisch um »Well-to-Tank«-Quantifizierungen zu erweitern und so die Matrix insgesamt auf eine »Well-to-Wheel«-Perspektive umzustellen. Eine solche Erhöhung der Reichweite ist jedoch an die Lösung der zuvor skizzierten Arbeitsaufgaben gebunden. So dürften beispielsweise bei der gegenwärtigen Datenlage detaillierte »Well-to-Tank«-Analysen für die beschriebenen Beispielm Modelle eher Verwirrung stiften als Klarheit schaffen.

Eine Bearbeitung dieser Agenda ermöglicht und erfordert nicht nur eine interdisziplinäre und interinstitutionelle Kooperation, sondern bietet darüber hinaus auch die Chance, die Zusammenarbeit zwischen Innovations-Praktikern und Innovations-Theoretikern zu vertiefen und effizienter zu gestalten, um so den dringend notwendigen Umbau der fossilen Automobilitäts-Gesellschaft weiter voranzutreiben und zu beschleunigen.

7. Bibliographie

7.1. Quellen zur Evaluations-Matrix

<div> <div> Fahrzeug- konfiguration (a,k) </div> <div> Evaluations- achse (e) </div> </div>				Technik						
				Gewicht (1)	Leistung (2)	Hubraum (3)	Elastizität (4)	Beschleunigung (5)	Geschwindigkeit (6)	Eta (7)
Antrieb (a)	Kraftstoff (k)	Konfig. (a,k)	Beispiel- Fahrzeug	[kg]	[kW]	[ccm]	[s] (60- 100km/h)	[s] (0- 100km/h)	[km/h]	[%]
4-Takt- Hubkolben- motor (1)	Diesel (1)	(1/1)	VW Golf V TDI	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	AMS 2005a ¹	AMS 2005a ¹	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	Benzin (2)	(1/2)	Ford Focus 5T	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	Ford 2007a,63 ¹	Ford 2007a,63 ¹	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	Autogas LPG (3)	(1/3)	Ford Focus 4T LPG	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	□	□	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	Erdgas LNG (4)	(1/4)	□	□	□	□	□	□	□	□
	Erdgas CNG (5)	(1/5)	Opel Astra Caravan	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	AMS 2005b ²	AMS 2005b ²	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	GTL (6)	(1/6)	VW Golf V TDI	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	AMS 2005a ²	AMS 2005a ²	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	BTL (7)	(1/7)	VW Golf V TDI	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	AMS 2005a ²	AMS 2005a ²	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	Biodiesel (RME) (8)	(1/8)	VW Golf V TDI	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	AMS 2005a ²	AMS 2005a ²	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	Pflanzenöl (9)	(1/9)	VW Golf V TDI	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	AMS 2005a ²	AMS 2005a ²	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	Bio-Ethanol (10)	(1/10)	Ford Focus FFV	e-mobile 2007 ¹	Ford 2007c ¹	Ford 2007c ¹	Ford 2007a,63 ¹	Ford 2007a,63 ¹	Ford 2007c ¹	Guzzella 2003 ³
	Bio-Methanol (11)	(1/11)	VW Jetta FFV	KBA 2005 ¹	Brustar 2005, 6	NYSERDA 1996, 45	□	NYSERDA 1996, 65	□	Guzzella 2003 ³
	Biogas (12)	(1/12)	Opel Astra Caravan	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	AMS 2005b ²	AMS 2005b ²	KBA 2005b ¹	Guzzella 2003 ³
	Wasserstoff LH2 (14)	(1/14)	BMW Hydrogen7	BMW 2006 ²	BMW 2006 ²	BMW 2006 ²	□	BMW 2006 ²	BMW 2006 ²	Guzzella 2003 ³
	Wasserstoff CGH2 (15)	(1/15)	Ford Focus C-MAX	□	H2cars ¹	H2cars ¹	□	Focus 2003 ³	Focus 2003 ²	□
2-Takt- Hubkolben- motor (2)	Diesel (1)	(2/1)	□	□	□	□	□	□	□	□
	Benzin (2)	(2/2)	Trabant P 601L	Focus 2006 ²	Focus 2006 ²	Focus 2006 ²	□	Focus 2006 ²	Focus 2006 ²	Guzzella 2003 ³
Winkel- motor (3)	Benzin (2)	(3/2)	Mazda RX-8	Mazda 2006 ¹	KBA 2005 ¹	Mazda 2006 ¹	AutoBild 2006	AutoBild 2006	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	CGH2 (15)	(3/15)	Mazda RX-8	Hauri 2006 ¹	Spiegel 2006 ¹	Spiegel 2006 ¹	□	□	Spiegel 2006 ¹	Guzzella 2003 ³
Mild Hybrid (5)	Diesel (1)	(5/1)	DC Bluet.-Hybrid	KBA 2005 ³	Auto-Motor 2005 ²	Auto-Motor 2005 ²	□	Auto-Motor 2005 ²	Auto-Motor 2005 ²	Guzzella 2003 ³
	Benzin (2)	(5/2)	Honda Civic IMA	Honda 2006 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	□	Honda 2006 ¹	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	Erdgas CNG (5)	(5/5)	□	□	□	□	□	□	□	□
	GTL (6)	(5/6)	DC Bluet.-Hybrid	KBA 2005 ³	Auto-Motor 2005 ²	Auto-Motor 2005 ²	□	Auto-Motor 2005 ²	Auto-Motor 2005 ²	Guzzella 2003 ³
	BTL (7)	(5/7)	DC Bluet.-Hybrid	KBA 2005 ³	Auto-Motor 2005 ²	Auto-Motor 2005 ²	□	Auto-Motor 2005 ²	Auto-Motor 2005 ²	Guzzella 2003 ³
	Biodiesel (RME) (8)	(5/8)	DC Bluet.-Hybrid	KBA 2005 ³	Auto-Motor 2005 ²	Auto-Motor 2005 ²	□	Auto-Motor 2005 ²	Auto-Motor 2005 ²	Guzzella 2003 ³
Voll Hybrid (6)	Diesel (1)	(6/1)	Peugeot 307	SZ 2006 ²	SZ 2006 ²	Peugeot 2006 ¹	□	SZ 2006 ²	SZ 2006 ²	Guzzella 2003 ³
	Benzin (2)	(6/2)	Toyota Prius II	e-mobile 2006a ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	□	AMS 2006a ²	KBA 2005 ¹	Guzzella 2003 ³
	Erdgas CNG (5)	(6/5)	Toyota Prius II	e-mobile 2006b ¹	KBA 2005 ¹	e-mobile 2006b ¹	□	AMS 2006a ²	e-mobile 2006b ¹	Guzzella 2003 ³
	GTL (6)	(6/6)	Peugeot 307	SZ 2006 ²	SZ 2006 ²	Peugeot 2007 ¹	□	SZ 2006 ²	SZ 2006 ²	Guzzella 2003 ³
	BTL (7)	(6/7)	Peugeot 307	SZ 2006 ²	SZ 2006 ²	Peugeot 2007 ¹	□	SZ 2006 ²	SZ 2006 ²	Guzzella 2003 ³
	Biodiesel (RME) (8)	(6/8)	Peugeot 307	SZ 2006 ²	SZ 2006 ²	Peugeot 2007 ¹	□	SZ 2006 ²	SZ 2006 ²	Guzzella 2003 ³
	Strom (13)	(6/13)	Toyota Prius II	DGS 2006 ²	KBA 2005 ¹	X	□	□	DGS 2006 ²	Guzzella 2003 ³
Batterie E- Antrieb (7)	Strom (13)	(7/13)	Renault Twingo elett.	e-mobile 2006c ¹	e-mobile 2006c ¹	X	e-mobile 2006c ¹	e-mobile 2006c ¹	e-mobile 2006c ¹	Guzzella 2003 ³
Brennstoff- zellen- Elektro- Antrieb (8)	Bio-Methanol (11)	(8/11)	DC Necar 5	Hycar 2006 ³	Hycar 2006 ³	X	□	Gazeau 2002	Hycar 2006 ³	Lamm 2002, 6 ² ; Wüchner ² 2003
	Wasserstoff LH2 (14)	(8/14)	Opel HydroGen 3	Hycar 2006 ³	Hycar 2006 ³	X	□	Hycar 2006 ³	Hycar 2006 ³	v.Helmolt ² 2007,836
	Wasserstoff CGH2 (15)	(8/15)	DC F-Cell	Hycar 2006 ³	Hycar 2006 ³	X	□	Hycar 2006 ³	Hycar 2006 ³	Wüchner ² 2003

e (a/k)	Ökonomie				Ökologie						Ranking	
	Ver- brauch (8)	Ver- brauch (9)	Ver- brauchs- kosten (10)	Preis (11)	CO ₂ (12)	CO° (13)	HC (14)	Nox (15)	Ruß (PM) (16)	Lärm (17)	CO ₂ (18)	CO ₂ /kW (19)
	[l/100 km]	[l/ 100 km] Benzinäq.	[EUR / 100km]	[EUR]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[PM]	[db(A)]	abs. Platz (e=12)	rel. Platz (e=12/e=2)
(1/1)	KBA 2005b ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	VW 2006b ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
e=12 / e=2	KBA 2005b ¹	KBA 2005b ¹	Quellen Abb. 27	Ford 2007b ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	Text Seite 59	KBA 2005 ¹	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
e=12 / e=2	KBA 2005b ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Ford 2007b ¹ ADAC2007b ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	Text Seite 59	KBA 2005 ¹	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(1/4)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
(1/5)	KBA 2005b ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Autobild 2004 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	Text Seite 59	KBA 2005 ¹	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(1/6)	Quellen Abb. 26	VW 2005 ²	Quellen Abb. 27	VW 2006b ¹	KBA 2005 ²	VW 2006a ²	VW 2006a ²	VW 2006a ²	VW 2006a ²	KBA 2005 ²	Spalte e=12	e Spalte e=12/e=2
(1/7)	Quellen Abb. 26	VW 2006 ²	Quellen Abb. 27	VW 2006b ¹	KBA 2005 ²	VW 2005,8 ²	VW 2005,8 ²	VW 2005,8 ²	VW 2005,8 ²	KBA 2005 ²	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(1/8)	Quellen Abb. 26	KBA 2005b ²	Quellen Abb. 27	VW 2006b ¹	Krien 2007,113	FAL 2003 ³ , 44-48	FAL 2003 ³ , 44-48	FAL 2003 ³ , 44-48	FAL 2003 ³ , 44-48	KBA 2005 ²	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(1/9)	Quellen Abb. 26	KBA 2005b ²	Quellen Abb. 27	VW 2006b ¹ VWP 2006 ²	Krien 2007,114	P.R.O. 2003 ²	P.R.O. 2003 ²	P.R.O. 2003 ²	P.R.O. 2003 ²	KBA 2005 ²	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(1/10)	e-mobile 2007 ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Ford 2006a ¹	Krien 2007,116	ADB 2006 ²	ADB 2006 ²	ADB 2006 ²	Text Seite 59	KBA 2005 ²	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(1/11)	NYSERDA 1996, 59 ²	Quellen Abb. 27	□	VW 2006b ¹ Mi 2005,4 ²	Krien 2007,115	NYSERDA 1996, 69	NYSERDA 1996, 69	NYSERDA 1996, 69	□	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(1/12)	KBA 2005b ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Autobild 2004 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	Text Seite 59	KBA 2005 ¹	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(1/14)	BMW 2006 ²	BMW 2006 ²	Quellen Abb. 27	BMW 2007 ¹ EUCAR 2007 ³ ,7	BMW 2006 ²	BMW 2005 ² , 32	BMW 2005 ² , 32	BMW 2005 ² , 32	Text Seite 59	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(1/15)	H2cars 2006 ²	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Ford 2006b ¹ EUCAR 2007,7 ³	BMW 2006 ²	BMW 2005 ² , 32	BMW 2005 ² , 32	BMW 2005 ² , 32	Text Seite 59	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(2/1)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
(2/2)	Focus 2006 ²	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Wikipedia 2006 ^{3*}	Oettinger 2006 ²	Oettinger 2006 ²	Oettinger 2006 ²	Oettinger 2006 ²	Oettinger 2006 ²	Oettinger 2006 ²	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(3/2)	KBA 2005b ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Mazda 2006 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	Text Seite 59	KBA 2005 ¹	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(3/15)	Spiegel 2006 ¹ , LBSt 2004,7	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Fahrberichte 2006 ²	BMW 2006 ²	BMW 2005 ² , 32	BMW 2005 ² , 32	BMW 2005 ² , 32	Text Seite 59	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(5/1)	FOS 2006 ³	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Grundhoff 2006 ¹	KBA 2005 ³	KBA 2005 ³	KBA 2005 ³	KBA 2005 ³	KBA 2005b ³	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(5/2)	KBA 2005b ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Honda 2006 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	Text Seite 59	KBA 2005 ¹	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(5/5)	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
(5/6)	FOS 2006 ³	Quellen Abb. 27	□	Grundhoff 2006 ¹	KBA 2005 ¹	VW 2006a ²	VW 2006a ²	VW 2006a ²	VW 2006a ²	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(5/7)	FOS 2006 ³	Quellen Abb. 27	□	Grundhoff 2006 ¹	KBA 2005 ¹	VW 2005,8 ²	VW 2005,8 ²	VW 2005,8 ²	VW 2005,8 ²	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(5/8)	FOS 2006 ³	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Grundhoff 2006 ¹	KBA 2005 ³	FAL 2003 ³ , 44-48	FAL 2003 ³ , 44-48	FAL 2003 ³ , 44-48	FAL 2003 ³ , 44-48	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(6/1)	Autokiste 2006 ²	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Peugeot 2006 ¹ , Auto- rep. 2006 ²	KBA 2005 ³	KBA 2005 ³	KBA 2005 ³	KBA 2005 ³	KBA 2005b ³	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(6/2)	KBA 2005b ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Toyota 2006 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005 ¹	KBA 2005b ¹	KBA 2005 ¹	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(6/5)	e-mobile 2006b ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	e-mobile 2006b ¹	e-mobile 2006b ¹	Kölner- bucht 2006 ³	Kölner- bucht 2006 ³	Kölner- bucht 2006 ³	Text Seite 59	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(6/6)	Autokiste 2006 ²	Quellen Abb. 27	□	Autorepor- ter 2006 ²	KBA 2005 ³	VW 2006a ²	VW 2006a ²	VW 2006a ²	VW 2006a ²	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(6/7)	Autokiste 2006 ²	Quellen Abb. 27	□	Autorepor- ter 2006 ²	KBA 2005 ³	VW 2005,8 ²	VW 2005,8 ²	VW 2005,8 ²	VW 2005,8 ²	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(6/8)	Autokiste 2006 ²	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Autorepor- ter 2006 ²	KBA 2005 ³	FAL 2003 ³ , 44-48	FAL 2003 ³ , 44-48	FAL 2003 ³ , 44-48	FAL 2003 ³ , 44-48	□	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(6/13)	DGS 2006 ²	Valence Tec. 2007	Quellen Abb. 27	Hymotion 2006 ^{2*}	X	X	X	X	X	Gerl 2002, 180	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(7/13)	e-mobile 2006c ¹	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	e-mobile 2006c ¹	X	X	X	X	X	Gerl 2002, 180	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(8/11)	Geitmann 2006, 53	□	□	MB 2007 ¹ , EUCAR 2007 ³ ,7	Ebner 2001 ²	Geitmann 2007 ²	Winter 2001, 5 ²	Ebner 2001 ²	Ebner 2001 ²	Gerl 2002, 180	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(8/14)	v.Helmolt 2007 ² ,836	Quellen Abb. 27	Quellen Abb. 27	Opel 2007 ¹ , EUCAR 2007 ³ ,7	X	X	X	X	X	Gerl 2002, 180	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2
(8/15)	Docter et al. 2005 ² , 9	Docter et al. 2005 ² , 9	Quellen Abb. 27	MB 2007 ¹ , Tillmetz/Benz 2006 ³ ,12	X	X	X	X	X	Gerl 2002, 180	Spalte e=12	Spalte e=12/e=2

* Daten umgerechnet von US\$, SFR, und D-Mark nach EUR (Kurs 0,772 und 0,621 am 5.1.07)

□ keine Daten recherchierbar. X technologisch ausgeschlossen

Quelle: eigene Darstellung

- ADAC (2007b): Information aus der Fahrzeugtechnik – Der ADAC-Kostenvergleich, auf Autogas oder Erdgas umrüsten? IN24434, Stand 04/07. Internet: www.adac.de/images/ADAC%20Kostenvergleich%20Umr%C3%BCstung%20Gasfahrzeuge_tcm8-131697.pdf. Zugriff: 29.05.2007
- ADB (Asian Development Bank) (2006): Vehicle Emissions Reduction. Internet: www.adb.org/vehicle-emissions/General/Alt-other.asp. Zugriff: 12.12.2006
- AMS (Auto Motor und Sport) (2005a): VW Golf gegen VW Golf Plus. Internet: www.auto-motor-und-sport.de/test_technik/vergleichstests/vw_golf_gegen_vw_golf_plus_hoch_bluete.76200.htm. Zugriff: 12.12.2006
- AMS (Auto Motor und Sport) (2005b): kompakte Kombis. Astra gegen Octavia und Focus. Internet: www.auto-motor-und-sport.de/test_technik/vergleichstests/kompakte_kombis_astra_gegen_octavia_und_focus.74562.htm. Zugriff: 12.12. 2006
- AMS (Auto Motor und Sport) (2006a): Toyota Prius Sol gegen Honda Civic Hybrid. Internet: www.auto-motor-und-sport.de/test_technik/vergleichstests/toyota_prius_sol_gegen_honda_civic_hybrid_watt_kampf.113787.htm. Zugriff: 12.12.2006
- AutoBild (2004): Verlängerung der "CNG"-Aktion – Opel gibt (Erd)Gas. Internet: [www. auto-bild.de/aktuell/meldungen/artikel.php?artikel_id=6771](http://www.auto-bild.de/aktuell/meldungen/artikel.php?artikel_id=6771). Zugriff: 04.01.2007
- AutoBild (2006): Test Alfa Brera gegen Mazda RX-8. Kunst kommt von Können. Internet: www.autobild.de/test/neuwagen/artikel.php?artikel_id=10784. Zugriff: 11.06.2007
- Auto-Motor (2005): Mercedes-Benz DIRECT HYBRID und BLUETEC HYBRID. Internet: www.auto-motor.at/Auto/Autos-Neuwagen/Automarken-Automodelle-Neuigkeiten/Mercedes-News/Mercedes-Hybrid-IAA.html. Zugriff: 04.01.2007
- auto-reporter (2007): PSA will Diesel-Hybrid angeblich früher bringen. Internet: www.auto-reporter.net/artikel.las?artikel=18976. Zugriff: 31.01.2007
- BMW (2006): Medieninformation. Der BMW Hydrogen 7. Broschüre und CD-Rom
- BMW (2007): Autokonfigurator. Internet: www.bmw.de/de/de. Zugriff: 11.04.2007
- BMWA (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit) (2005): Strategiepapier zum Forschungsbedarf in der Wasserstoff-Energietechnologie. Forschungsbericht Nr. 546
- Brustar, Mathew (2005): Economical, High-Efficiency Engine Technologies for Alcohol Fuels. Internet: www.methanol.org/pdf/ISAF-XV-EPA.pdf. Zugriff: 12.12. 2006
- DGS (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie) (2006): Solare Mobilität. EnergyCS Plug-In Prius. Internet: www.dgs.de/fileadmin/files/FASM/FASM-2006-Flyer-EnergyCS-Prius.pdf. Zugriff: 22.01.2007
- Docter, Andreas; Fleck, Wolfram; Frank, Georg et al. (2005): Technical Status and Future Perspectives for PEM Fuel Cell Systems at DaimlerChrysler. Vortrag.
- Ebner, Johannes (2001): Fuel Cell Project. DaimlerChrysler AG. Brennstoffzellenantriebe für Kraftfahrzeuge. Internet: [www.stuttgarter-forum.de/ pdf/Vortrag-Ebners.pdf](http://www.stuttgarter-forum.de/pdf/Vortrag-Ebners.pdf). Zugriff: 13.02.2007
- e-mobile (2006a): Homepage : Fahrzeuge : Cleaner Drive : Jetzt bewerten. Internet: www.e-mobile.ch/index.php?pid=de,2,86. Zugriff: 12.12.2006
- e-mobile (2006b): Prius II Erdgas Modellinformationen. Internet: www.e-mobile.ch/pdf/2006/ToyotaPrius-CNG_DW.pdf. Zugriff: 12.12.2006
- e-mobile (2006c): Twingo Quickshift elettrica. Technische Informationen. Internet: www.e-mobile.ch/pdf/2006/Fact-Sheet_TwingoElektra-2006_DW.pdf. Zugriff: 12.12.2006
- e-mobile (2007): Bioethanol-Fahrzeuge. Internet: www.e-mobile.ch/index.php?pid= de,2,91. Zugriff: 29.01.2007
- e-mobile.ch (2006) www.e-mobile.ch. Zugriff: 2006

- EUCAR (European Council for Automotive R&D) (2007): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Tank-to-Wheels Report; Version 2c, March 2007. TTW Appendix 1. Vehicle retail price estimation. Internet: http://ies.jrc.cec.eu.int/media/scripts/getfile.php?file=fileadmin/H04/Well_to_Wheels/TTW/TTW_App_1_010307.pdf. Zugriff: 25.5.2007
- Fahrberichte (2006): Mazda RX-8 Hydrogen RE. Internet: www.fahrberichte.de/index2.php?option=com_fahrbericht&do_pdf=1&id=951. Zugriff: 21.12.2006
- FAL (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft) (2003): Systematische Untersuchungen aus der motorischen Verbrennung von RME MK1 und DK. Internet: www.agqm-biodiesel.de/downloads/pdfs/FAL_252_MK1.pdf. Zugriff: 12.12.2006
- Focus (2003): Neuer Nugget im Fluss – Ford C-Max. Internet: www.focus.de/auto/fahrberichte/ford-c-max_fb_id_292.html?sub_kat=5. Zugriff: 17.01.2007
- Focus (2004): Viertürer mit zwei Scheiben Mazda RX-8. Internet: www.focus.de/auto/fahrberichte/mazda-rx-8_fb_id_241.html?sub_kat=5. Zugriff: 12.12.2006
- Focus (2006): Der Ost-Käfer – Trabant P 601L. Internet: www.focus.de/auto/fahrberichte/trabant-p-601l_fb_id_297.html?sub_kat=5. Zugriff: 12.12.2006
- Ford (2006a): Ford Focus flexifuel, Ford Focus C-MAX flexifuel. Preisliste 07.09.2006
- Ford (2006b): Ford Focus C-MAX. Preisliste 07.09.2006
- Ford (2007a): FordFocus – Feel the difference. Verkaufskatalog. Internet: www.ford.de/ie/focus/-/kataloge-preise-pkw/-/-/60907#. Zugriff: 13.07.2007
- Ford (2007b): FordFocus – Preisliste 23.02.2007.
- Ford (2007c): Ford FlexiFuel Modelle mit Bio-Ethanol-Antrieb. Verkaufsprospekt. Internet: http://www.ford.de/ie/alternative_antriebe/-/uumw08#. Zugriff: 14.07.2007
- FOS (Focus online Spezial) (2006): Für alle Verbrennungsmotoren – Mild-Hybrid mit Start-Stop. Internet: www.focus.de/auto/iaa2005/mercedeshybrid/fuer-alle-verbrennungsmotoren_aid_16560.html. Zugriff: 04.01.2007
- Gazeau, Yvonnick (2002): Mercedes met à la route 60 Classe A et 30 bus propulsés par pile à combustible. Internet: www.auto-innovations.com/actualite/actu-z02energy.html. Zugriff: 14.02.2007
- Geitmann, Sven (2006): Wasserstoffautos: Was uns in Zukunft bewegt. Kremmen: Hydrogeit-Verlag
- Geitmann, Sven (2007): Wissen / H₂ – Studie. Kraftstoff H₂. 7.2 PEM. Internet: www.hydrogeit.de/wasserstoff_als_kraftstoff.htm. Zugriff: 04.01.2007
- Gerl, Bernhard (2002): Innovative Automobilantriebe – Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen, Landsberg/Lech: Verlag moderne Industrie.
- Grundhoff, Stefan (2006): Mercedes E 320 Bluetec. Die Zukunft ist blau. Internet: www.focus.de/auto/neuwagen/neuheiten/mercedes-bluetec_aid_24290.html. Zugriff: 12.12.2006
- Guzzella, Lino (2003): Technische Lösungsansätze für eine sinnvolle individuelle Mobilität. Internet: www.ngsh.ch/ngsh_downloads/Loesungsansaetze_Individuelle_Mobilitaet.pdf. Zugriff: 17.01.2007
- H2cars (2006): Cars 2004. Internet: www.h2cars.de. Zugriff: 17.01.2007
- Hauri, Stephan (2006): Vorteil für Wankelmotor. Automobil Revue vom 30.08.2006, S. 11
- Helmolt von, Rittmar; Eberle, Ulrich (2007): Fuel cell vehicles: Status 2007. In: Journal of Power Sources, 165 (2007), S. 833-845

- Honda (2006): Technik Civic IMA.
Internet: www.honda.ch/pdf/civic_ima/d_technik_civic_ima.pdf. Zugriff: 12.12.2006
- Hybrid-Autos (2006): Technische Daten des Mazda RX-8 Hydrogen RE.
Internet: www.hybrid-autos.info/Mazda_RX_8_Hydrogen_Re_2006_Technik.html. Zugriff: 23.03.2007
- Hycar (2006): Bereich Fahrzeugkonzepte. Internet: www.Hycar.de. Zugriff: 04.01.2007
- Hymotion (2006): FAQ. Q3 – How much will a Hymotion plug-in kit cost, including installation? Internet: <http://hymotion.com/faq.htm>. Zugriff: 12.12.2006
- IWR (Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien) (2006): Biodiesel. Internet: www.iwr.de/biodiesel. Zugriff: 15.12.2006
- KBA (Kraftfahrtbundesamt) (2005): Verzeichnis der Kraftstoffverbrauchs- und Emissions-Typprüfwerte. 16. Ausgabe, Fassung: Dezember 2005. Daten-CD
- Kölnerbucht (2006): Fahren mit Erdgas: Umweltschonend und wirtschaftlich.
Internet: www.koelnerbucht.de/auv-fahrenmiterdgas.php. Zugriff: 05.03.2007
- Krien, Philipp (2007): Systematisierung und Bewertung alternativer Kraftstoffe und Antriebe für Personenkraftwagen. Diplomarbeit an der Hochschule Ulm. Fachbereich Produktionstechnik und Organisation
- Lamm, Arnold (2002): PEM BZ-Systeme für den mobilen Einsatz. Vortrag. Internet: www.sfb374.uni-stuttgart.de/rv_02_03/PEM_Brennstoffzelle_Lamm.pdf. Zugriff: 14.5.2007
- LBSt (Ludwig Bölkow Systemtechnik) (2004): Entwicklungsstand und -perspektiven von Wasserstoffspeichern für mobile und portable Anwendungen.
Internet: www.hyweb.de/Wissen/pdf/hdt2001.pdf. Zugriff: 23.03.2007
- Mazda (2006): Mazda RX-8. Internet: www.mazda.de/Showroom/RX-8/?__click=HP_crmrx8&__cpgsub=HP_crmrx8&model=Mazda_RX-8. Zugriff: 12.12.2006
- MB (Mercedes-Benz) (2007): Preise für die A-Klasse. Gültig ab 1. Januar 2007. Internet: www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/dehome_mpc/passenger_cars/home/products/new_cars/a_class_5door/prices.html. Zugriff: 11.04.2007
- MI (Methanol Institute) (2005): Methanol Transportation Fuels: A Look Back and a Look Forward. Internet: www.methanol.org/contentIndex.cfm?section=alt_Fuel&topic=special_Reports&title=Index. Zugriff: 28.03.2007
- NYSERDA (New York State Energy Research and Development Authority) (1996): Methanol and ethanol.
Internet: www.nyserda.org/programs/pdfs/VOL3SC22.PDF. Zugriff: 29.01.2007
- Oettinger, Gert (2006): Nähere Infos zum Trabbi Kat. Auskunft vom 21.12.2006 Email: oettinger@trabant-kat.de
- Opel (2007): Konfigurator.
Internet: www.opel.de/configuratoroverview/content.act Zugriff: 11.04.2007
- P.R.O. (Projektorganisation Regionale Oelpflanzennutzung e.V.) (2003): Tank Sonne.
Internet: www.regiooel.de/. Zugriff: 12.12.2006
- Peugeot (2006): Peugeot // 307–307 Break. Preise Ausstattungen und technische Daten. 1. Oktober 2006. Peugeot Deutschland GmbH
- Spiegel (2006): MAZDA RX-8 HYDROGEN RE Zukunft auf Knopfdruck.
Internet: www.spiegel.de/auto/fahrberichte/0,1518,433590,00.html. Zugriff: 12.12.2006
- SZ (Süddeutsche Zeitung) (2006): Gallische Hybrid-Offensive.
Internet: www.sueddeutsche.de/automobil/artikel/134/79055/. Zugriff: 12.12.2006

Tillmetz, Werner; Benz, Uwe (2006): Methanol Fuel Cell Power Train. Vortrag. European Biofuel Congress, 17.Oktober 2006, Essen

Toyota (2006): Prius. Preise, Ausstattungen & technische Details. Broschüre

Valence Tec. (2007): Hybrid Vehicles.

Internet: www.valence.com/hev.asp. Zugriff: 03.01.2007

VW (Volkswagen AG) (2005): SunFuel® – der Weg zur nachhaltigen Mobilität. Internet: www.volkswagen-umwelt.de/_download/141205_RZ05D_sunf_ccp_30.pdf. Zugriff: 21.12.2006

VW (Volkswagen AG) (2006b): Preisliste. gültig für das Modelljahr 2007. Ausgabe: 1. Juni 2006

WVP (2006): Produkte. Pkw. Pumpe Düse Motoren der VW-Gruppe (VW, Audi, Seat, Skoda). Internet: www.pflanzenoel-motor.de/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=51. Zugriff: 21.12.2006

Wikipedia (2006): Stichwort: Trabant. Überschrift: Trabant 1.1. Internet: http://de.wikipedia.org/wiki/Trabant_%28Pkw%29. Zugriff: 12.12.2006

Winter, Martin (2001): Die Brennstoffzellentechnologie – Fahren ohne Emissionen. Internet: www.martinwinter.gmxhome.de/hydrogen/pdf/brennstoffzelle_referat.pdf. Zugriff: 22.03.2007

Wüchner, Erwin (2003): Handout zum Vortrag von Dr. Erwin Wüchner, Senior Manager Entwicklung Wasserstoffspeichersystem/Infrastruktur, DaimlerChrysler AG, Sindelfingen. Internet: [www.linde-gas.de/international/web/lg/de/likelgde30.nsf/repositorybyalias/wasserstofftag-03_wuechner_handout/\\$file/WASSERSTOFF_TAG-03_WUECHNER_HANDOUT.pdf](http://www.linde-gas.de/international/web/lg/de/likelgde30.nsf/repositorybyalias/wasserstofftag-03_wuechner_handout/$file/WASSERSTOFF_TAG-03_WUECHNER_HANDOUT.pdf). Zugriff: 11.10.2007

7.2. Literatur

- Abernathy, William J.; Clark, Kim B. (1985): Innovation: Mapping the Winds of Creative Destruction, In: Research Policy, 14/1, S. 3-22
- ADAC (2006a): Informationen aus der Fahrzeugtechnik – Der ADAC EcoTest: Test- und Bewertungskriterien. IN23717, Stand: 04/06.
Internet: www.adac.de/images/23717_tcm8-143973.pdf. Zugriff: 09.05.2007
- ADAC (2006b): Der ADAC ECO-Test 2006. Internet: www.adac.de/images/ECO_II_tcm8-142724.pdf. Zugriff: 09.05.2007
- ADAC (2007a): Entwicklung der Anzahl und Markenverteilung der Tankstellen in Deutschland. Internet: www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/zahlen_fakten/Entwicklung_der_Zahl_der_Tankstellen_und_Markenverteilung/default.asp?ComponentID=4255&SourcePageID=10100. Zugriff: 07.04.2007
- ADAC (2007b): Information aus der Fahrzeugtechnik – Der ADAC-Kostenvergleich, auf Autogas oder Erdgas umrüsten? IN24434, Stand 04/07. Internet: www.adac.de/images/ADAC%20Kostenvergleich%20Umr%C3%BCstung%20Gasfahrzeuge_tcm8-131697.pdf. Zugriff: 29.05.2007
- ADAC (2007c): Information aus der Fahrzeugtechnik – Marktübersicht: Neuwagen mit Partikelfilter. IN23331, Stand: 04/07. Internet: www.adac.de/images/Russ_partikelfilter-DPF-Markt%C3%BCbersicht_tcm8-112777.pdf. Zugriff: 29.05.2007
- AECC (Association for Emissions Control by Catalysts) (2006): Air Quality and Health Effects. Internet: www.aecc.be/de/Air_Quality_and_Health_Effects.html. Zugriff: 25.09.2006
- Aigle, Thomas; Marz, Lutz (2007): Innovationen und Automobilität. Versuch einer interdisziplinären Systematisierung. Discussion Paper SP III 2007-102, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung
- Altwater, Elmar (2006): Das Ende des Kapitalismus. In: Blätter für deutsche und internationale Politik, Heft 2/2006, S. 171-182
- AMETSOC (American Meteorological Society) (2006): Legislation – A look at U.S. air pollution laws and their amendments.
Internet: www.ametsoc.org/sloan/cleanair. Zugriff: 28.11.2006
- AMS (Auto Motor und Sport) (2007): CO₂-Sparpotential von Wasserstoff. Graphische Darstellung in Sonderteil: Alternative Antriebe. Heft 11/2007, S. 133-151
- Aral Forschung (2007): Frequently Asked Questions. Internet: www.aral.de/aral/faq.do?categoryId=4000141&contentId=56034. Zugriff: 14.02.2007
- Ärzteblatt (2006): Feinstaub – Grenzwerte überdenken. Deutsches Ärzteblatt 103, Ausgabe 4 vom 27.01.2006. Internet: <http://www.aerzteblatt.de/v4/archiv/artikel.asp?src=heft&id=49958>. Zugriff: 25.05.2007
- ASFE (2006): Synthetic fuels: Driving towards sustainable mobility. Internet: www.euractiv.com/31/images/asfe_tcm31-153324.pdf. Zugriff: 06.03.2007
- ASPO (Association for the Study of Peak Oil&Gas) (2006): Homepage. Internet: www.peakoil.net. Zugriff: 08.08.2006
- Assenmacher, Harry (2003): Sauber, aber selten. Erdgasautos. In: Öko-Test Juni 2003. Internet: www.opel-osv.de/Presse.aspx?item=21&flash=1&ID=336. Zugriff: 28.11.2006
- Automobil Produktion (2006): Märkte. Internet: www.automobil-roduktion.de/themen/12941/index.php. Zugriff: 28.11.2006
- auto-presse (2006): Bluetec-Mercedes erreicht Bin-8-Norm. Internet: www.auto-presse.de/news-auto.php?newsid=13402. Zugriff: 07.02.2007

- Bach, C. (1882): Mitteilungen über die internationale Ausstellung von Apparaten und Einrichtungen zur Vermeidung des Rauches (International exhibition of smoke preventing appliances) in London 1881. In: Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 26(1), S. 40-47
- Barben, Daniel (1996): Theorietechnik und Politik bei Niklas Luhmann. Grenzen einer universalen Theorie der modernen Gesellschaft, Opladen: Westdeutscher Verlag
- BdE (Bund der Energieverbraucher) (2006): Strompreise. Internet: www.energieverbraucher.de/de/Energiebezug/Strom/site__378/. Zugriff: 23.01.2007
- BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.) (2006): Positionspapier. Industriezölle senken! Warum die deutsche Industrie von der Doha-Runde substanzielle Verbesserungen beim Marktzugang erwartet. Internet: www.bdi-online.de/sbrecherche/infostartpage.asp?InfoID=% Zugriff: 05.07.2006
- Becker, Kai (2004): Innovation und Biotechnologie. Eine Betrachtung zyklischer Entwicklungen mit der Theorie der langen Wellen. Internet: www.zhb-flensburg.de/dissert/becker/becker.pdf. Zugriff: 24.07.2006
- BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung) (2006): Krebserregende Wirkung von eingeatmetem Formaldehyd hinreichend belegt. BfR stellt Ergebnisse wissenschaftlicher Bewertung vor und empfiehlt neue Einstufung. Internet: www.bfr.bund.de/cd/7858. Zugriff: 15.02.2007
- Birol, Fatih (2002): World Oil Outlook to 2030. Internet: <http://www.iea.org/textbase/speech/2001-2002/birol.pdf>. Zugriff: 09.08.2006
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2003): Herausforderung Klimawandel. Internet: www.bmbf.de/pub/klimawandel.pdf. Zugriff: 03.08.2006
- BMELF (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten), BMLU (Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen) (1985): Wald in Gefahr. In: Baum, Fritz (Hg) (1988): Luftreinhaltung in der Praxis. München: Oldenbourg, S. 278-279
- BMF (Bundesministerium für Finanzen) (2005a): Kfz-Steuer für Pkw. Internet: www.bundesfinanzministerium.de/lang_de/DE/Service/Downloads/Abt__IV/023,templateId=raw,property=publicationFile.pdf. Zugriff: 06.12.2006
- BMF (Bundesministerium für Finanzen) (2005b): Entwicklung der Mineralöl- und Stromsteuersätze in der Bundesrepublik Deutschland. Internet: http://www.bundesfinanzministerium.de/lang_de/DE/Service/Downloads/Abt__IV/060,templateId=raw,property=publicationFile.pdf. Zugriff: 06.12.2006
- BMU (Bundesministerium für Umwelt) (2005): Gabriel begrüßt Vorschlag der EU-Kommission für Euro-5-Norm. Grenzwerte für Stickoxide müssen noch nachgebessert werden. Internet: www.bmu.de/pressemitteilungen/pressemitteilungen_ab_22112005/pm/36460.php. Zugriff: 28.11.2006
- BMU (Bundesministerium für Umwelt) (2006): Immissionsschutzrecht in Deutschland www.bmu.de/files/luftreinhaltung/downloads/application/pdf/hintergrund_bimschg.pdf. Zugriff: 27.11.2006
- BMW (2006): Medieninformation. Der BMW Hydrogen 7.
- BMWA (Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit) (2005): Strategiepapier zum Forschungsbedarf in der Wasserstoff-Energietechnologie. Forschungsbericht Nr. 546
- Boklisch, Steffen F. (1987): Prozeßanalyse mit unscharfen Verfahren. Berlin: VEB Verlag Technik
- Borchert, Jan; Goos, Philipp; Hagenhoff, Svenja (2003): Innovations- und Technologie-management: Eine Bestandsaufnahme. Institut für Wirtschaftsinformatik. Georg-August-Universität Göttingen. Arbeitsbericht Nr. 4/2003

- Bosch (2005): Bosch-Geschäftsführer Dr. Siegfried Dais auf der 75-Jahr-Feier des FKFS in Stuttgart: "Alle zehn Jahre wird das Auto neu erfunden". Pressemitteilung, Internet: www.cardor.de/nachrichten/anzeigen.php?id=705, Zugriff: 12.09.2006
- BP (2007): Alternative Energy – CNG Erdgastankstellen. Internet: www.onlinebp.de/jahresbericht05/kap050311.html. Zugriff: 10.04.2007
- Braun, Michael; Feige, Andreas; Sommerlatte, Tom (Hg.) (2001): Business Innovation: Quantensprung statt "Innovatiönchen". Ein Wegweiser zur zielgerichteten Geschäftserneuerung. Frankfurt/Main: F.A.Z.-Institut
- Bruckner, Eberhard; Ebeling, Werner; Scharnhorst, Andrea (1998): Technologischer Wandel und Innovation – Stochastische Modelle für innovativer Veränderungen in der Ökonomie, In: Pohlmann, Ludwig (Hg.) (1998): Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften, Berlin: Duncker & Humblot, S. 361-382
- Bruckner, Eberhard; Ebeling, Werner; Jiménez Montaña, Miguel A.; Scharnhorst, Andrea (1993): Technological Innovations – A Self-Organisation Approach. Discussion Paper FS II 93-302, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung
- Brüggemeier, Franz-Josef; Toyka-Seid, Michael (Hg.) (1995): Industrie-Natur – Lesebuch zur Geschichte der Umwelt im 19. Jahrhundert. Fankfurt/New York: Campus
- Buhr, Regina; Canzler, Weert; Knie, Andreas; Rammner, Stephan (Hg.) (1999): Bewegende Moderne. Fahrzeugverkehr als soziale Praxis. Berlin: edition sigma
- Businessportal24: EU-Strategie zur Treibhausgasreduzierung im Verkehr. Pressemitteilung des VCD-Verkehrsclub Deutschland, Internet: www.businessportal24.com/de/EU_Strategie_Treibhausgasreduzierung_Verkehr_106597.html. Zugriff: 14.02.2007
- C.A.R.M.E.N. (Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk) (2006): Preisentwicklung bei Bio-Ethanol (E85). Internet: www.carmen-ev.de/dt/energie/beispielprojekte/biotreibstoffe/ethanol/preis/index.htm. Zugriff: 15.12.2006
- C.A.R.M.E.N. (Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk) (2007): Preisentwicklung bei Rapsöl als Kraftstoff. Internet: www.carmen-ev.de/dt/energie/bezugsquellen/pflaodelpreise.html. Zugriff: 15.12.2006
- Canzler, Weert (1996): Das Zauberlehrlings-Syndrom. Entstehung und Stabilität des Automobil-Leitbildes. Berlin: edition sigma
- Canzler, Weert (1997): Der Erfolg des Automobils und das Zauberlehrlings-Syndrom. In: Dierkes, Meinolf (Hg.) (1997): Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm. Berlin: edition sigma, S. 99-129
- Canzler, Weert; Knie, Andreas (1994): Das Ende des Automobils. Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft. Heidelberg: C.F. Müller
- Canzler, Weert; Knie, Andreas (1998): Möglichkeitsräume. Grundrisse einer modernen Mobilitäts- und Verkehrspolitik. Wien/Köln/Weimar: Böhlau
- Canzler, Weert; Marz, Lutz (1997): Stagnovation. Der Automobilpakt und die gedopte Arbeitsgesellschaft. In: Universitas, Jg. 52 (1997), H. 610, S. 359-371
- Canzler, Weert; Schmidt, Gert (Hg.) (2003): Das zweite Jahrhundert des Automobils. Technische Innovationen, ökonomische Dynamik und kulturelle Aspekte. Berlin: edition sigma
- CARB (Californian Air Resource Board) (2004): ZEV Tutorial Part 2 – ZEV Program History and Technology Story Slides 21-30. Internet: www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/factsheets/tutorial/2history21thru30.pdf. Zugriff: 28.11.2006

- CARB (Californian Air Resource Board) (2005): The California Low-Emission Vehicle Regulations for Passenger Cars, Light-Duty Trucks and Medium-Duty Vehicles. Internet: www.arb.ca.gov/msprog/levprog/test_proc.htm. Zugriff: 28.11.2006
- CARB (Californian Air Resource Board) (2006a): California's Air Quality History Key Events. www.arb.ca.gov/html/brochure/history.htm. Zugriff: 28.11.2006
- CARB (Californian Air Resource Board) (2006b): Buying a Vehicle Out of State. Internet: www.arb.ca.gov/msprog/NonCAVeh/NonCAVeh.pdf. Zugriff: 28.11.2006
- CO2-Handel (2007): EU-Kommission begrenzt Pkw-Emissionen auf 120g CO2/km. Internet: www.co2-handel.de/article185_4352.html. Zugriff: 14.02.2007
- DaimlerChrysler (2006): Ein Duo mit Zukunft – Neue Wege der Stickoxidminderung. Internet: www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7179-49-627595-1-0-0-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0.html. Zugriff: 12.07.2007
- Debus, Christian (2002): Routine und Innovation. Management langfristigen Wachstums etablierter Unternehmungen. Marburg Förderzentrum für Existenzgründer aus der Universität (Mafex), Band 4, 2002, Marburg: Mafex
- DeTeFleetServices GmbH (2006): Erste reine Biogastankstelle in Niedersachsen eröffnet. Internet: www.detefleetservices.de/DeTeFleet/aktuelles/november_06/061123.html. Zugriff: 03.01.2007
- Deutsch, Karl (1949): Innovation, Entrepreneurship and the Learning Process, In: A. H. Cole (Hg.): Change and the Entrepreneur, S. 24-29
- Deutscher Bundestag (2005): Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestag. Der aktuelle Begriff: Feinstaub-Richtlinie. Nr. 14/2005. Internet: www.bundestag.de/bic/analysen/2005/2005_03_21.pdf. Zugriff: 14.02.2007
- Dow Jones Newswire (2006): DaimlerChrysler schließt US-Diesel-Allianz mit VW und Audi. Artikel in Finanznachrichten.de, erschienen 29.11.2006. Internet: www.finanznachrichten.de/nachrichten-2006-11/artikel-7376815.asp. Zugriff: 08.03.2007
- DZBI (Deutsche Zentrale für biologische Information) (2006): Freie Enzyklopädie. Stichwort Luftverschmutzung. Internet: www.biologie.de/biowiki/Luftverschmutzung. Zugriff: 28.11.2006
- Ebeling, Werner; Scharnhorst, Andrea (2002): Technische Evolution aus der Sicht der Theorie der Selbstorganisation. In: Parthey, Heinrich; Spur, Günter (Hg.) (2002): Wissenschaftsforschung. Jahrbuch 2001. Wissenschaft und Innovation, S. 59-73.
- Einfach-Autos (2007). Bildergalerie. Internet: www.einfach-autos.de/bildergalerie. Zugriff: 11.04.2007
- eMercedesBenz (2005): Mercedes Introduces Hybrid S-Class. Internet: www.emercedesbenz.com/Sep05/13MercedesIntroducesHybridSClass.htm. Zugriff: 11.04.2007
- e-mobile (2007a): Fahrzeuge-Marktübersicht-4-rädrige Elektrofahrzeuge. Internet: www.e-mobile.ch/index.php?pid=de,2,21. Zugriff: 11.04.2007
- e-mobile (2007b): Fahrzeuge – Cleaner Drive. Internet: www.e-mobile.ch/index.php?pid=de,2,81. Zugriff: 14.04.2007
- Energieportal24 (2006a): Erdgas-Preise. Internet: www.energieportal24.de/erdgas_fluessiggas_erdgas_preise.php. Zugriff: 15.12.2006
- Energieportal24 (2006b): Wasserstoff Herstellungskosten. Beispiele. Internet: www.energieportal24.de/wasserstoff_herstellung_herstellungskosten.php. Zugriff: 21.12.2006
- Enquete-Kommission Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung (2002): Endbericht der Enquete-Kommission "Nachhaltige

Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung"
Berlin: Deutscher Bundestag. Bundestagsdrucksache 14/9400

EnRo (Portal für Energie und Rohstoffe) (2006): News. Bio-Ethanol-Tankstelle – Ford eröffnet Bio-Ethanol-Tankstelle auf Kölner Werksgelände. Artikel, 26. Juli 2006. Internet: www.enro-portal.de/news/do-read/id-561/read.html. Zugriff: 10.4.2007

EP (Europäisches Parlament) (2000): CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen: Überwachung. Rechtsakt der EU, Internet: <http://europa.eu/scadplus/printversion/de/lvb/l28055.htm>. Zugriff: 14.02.2007

EP (Europäisches Parlament) (2006): Strengere Abgasnormen für Kraftfahrzeuge: EP beschließt Euro 5- und Euro 6- Normen. Information Verkehr – 13-12-2006 – 14:08. Internet: www.europarl.europa.eu/news/expert/infopress_page/062-1361-345-12-50-910-20061207IPR01151-11-12-2006-2006-false/default_de.htm. Zugriff: 13.01.2007

Erdgasfahrzeuge (2006): Das Erdgasfahrzeug. FAQ. Internet: www.erdgasfahrzeuge.de/verkaufsboerse.html. Zugriff: 08.03.2007

EUCAR (European Council for Automotive R&D) (2007): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Tank-to-Wheels Report; Version 2c, March 2007. TTW Appendix 1. Vehicle retail price estimation. Internet: http://ies.jrc.cec.eu.int/media/scripts/getfile.php?file=fileadmin/H04/Well_to_Wheels/TTW/TTW_App_1_010307.pdf. Zugriff: 25.05.2007

EurActiv (2006): EURO-5-Emissionsvorschriften für Fahrzeuge. Erschienen: Freitag 8. April 2005, Aktualisiert: Freitag 15. Dezember 2006. Internet: www.euractiv.com/de/verkehr/euro-5-emissionsvorschriften-fahrzeuge/article-137720. Zugriff: 16.01.2007

EurActiv (2007): Autos und CO₂. Erschienen: Dienstag 13. März 2007, Aktualisiert: Mittwoch 11. April 2007. Internet: www.euractiv.com/de/verkehr/autos-co2/article-162421. Zugriff: 16.4.2007

eur-lex (1999): Richtlinie 1999/100/EG der Kommission zur Anpassung der Richtlinie 80/1268/EWG über die Kohlendioxidemissionen und den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt. Amtsblatt Nr. L 334 vom 28/12/1999 S. 0036 - 0040. Internet: www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/j/1999/l_334/l_33419991228de00360040.pdf. Zugriff: 08.01.2007

Europäische Kommission (2005): Luftverschmutzung – Höchste Zeit für reine Luft, In: Umwelt für Europäer. Informationsblatt der Generaldirektionsumwelt. Ausgabe Nr. 20, Juni 2005. ISSN 1563-4175, S. 4-5

Europäische Kommission (2007): Kommission plant Rechtsrahmen, um die Erfüllung der EU-Ziele für geringere CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen sicherzustellen, IP/07/155. Internet: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/07/155&format=PDF&aged=0&language=DE&guiLanguage=en>. Zugriff: 10.02.2007

Fisher, John C.; Prey, Robert, H. (1971): A Simple Substitution Model of Technological Change, In: Technological Forecasting and Social Change 1971, Vol. 3, S. 75-88

Focus-online (2007): Mercedes E 320 Bluetec – die Zukunft ist Blau. Neuheiten Auto. Internet: www.focus.de/auto/neuwagen/neuheiten/mercedes-bluetec_aid_24290.html. Zugriff: 07.02.2007

Foray, Dominique; Grübler, Arnulf (1990): Morphological Analysis. Diffusion and Lock-Out of Technologies: Ferrous in France and the FRG, In: Research Policy 1990, Vol. 19, S. 535-550

Foucault, Michel (1993): Technologien des Selbst. In: Martin, Luther H. (Hg.) (1993): Technologien des Selbst. Frankfurt/Main: Fischer, S. 24-62

Freesen, Ines (2005): Technologien für den Hydrogen Highway. Internet: www.innovations-report.de/html/berichte/messenachrichten/bericht-47507.html. Zugriff: 28.11.2006

- Gambardella, Pascal (2006): Innovation Frameworks. Survey and Synthesis of Current Innovation Approaches. Internet: www.csc.com/aboutus/lef/mds67_off/uploads/2006InnovationFrameworksReport.pdf. Zugriff: 22.08.2006
- Geitmann, Sven (2004): Erneuerbare Energien & und alternative Kraftstoffe. Kremen: Hydrogeit-Verlag
- Geitmann, Sven (2005): Wissen-Autogas. Internet: <http://hydrogeit.de/autogas-3.htm>. Zugriff: 15.12.2006
- Gerl, Bernhard (2002): Innovative Automobilantriebe – Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen, Landsberg/Lech: Verlag moderne Industrie.
- Gieck, K. und R. (1995): Technische Formelsammlung. Germering: Gieck Verlag
- Goldman Sachs Global Investment Research (2005): US Energy: Oil United States. March 30
- H2-Cars (2007): Cars 2000-2006. Internet: www.h2cars.de. Zugriff: 11.04.2007
- H2-Stations (2007): Hydrogen Filling Stations worldwide. Internet: www.h2stations.org. Zugriff: 05.04.2007
- Handelsblatt (2006): Kohlendioxid-Reduzierung – Autohersteller verbitten sich ein CO2-Gesetz. Artikel vom 13.12.2006, Internet: www.handelsblatt.com/news/Unternehmen/Industrie/_pv/grid_id/1356618/_p/200038/_t/ft/_b/1184286/default.aspx/autohersteller-verbitten-sich-ein-co2-gesetz.html. Zugriff: 27.01.2007
- Handelsblatt (2007): Otto kriegt Druck. Pressemitteilung, erschienen 24.6.2006. Internet: www.handelsblatt.com/news/Auto/Technik-Sicherheit/_pv/doc_page/2/_p/301626/_t/ft/_b/1097122/default.aspx/otto-kriegt-druck.html. Zugriff: 28.02.2007
- Hartlieb, Jutta (2006): Feinstaub Streit – Tauziehen um Grenzwerte. In: Spiegel-Online. Internet: www.spiegel.de/auto/werkstatt/0,1518,436017,00.html, Zugriff 08.09.2006
- Hauschildt, Jürgen (1993): Innovationsmanagement. München: Vahlen
- HBS (Hamburger Bildungsserver) (2006): Anthropogener Klimawandel. Internet: <http://hamburger-Bildungsserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/klimawandel/ursachen.html>. Zugriff: 09.08.2006
- Henderson, Rebecca M.; Clark, Kim B. (1990): Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms, In: Administrative Quarterly Vol. 35, Nr. 1, S. 9-30
- Hunsicker, Frank; Knie, Andreas; Lange, Günter (2007): Wie korrekt sind die Nachfragedaten des Straßenverkehrs? Eine kritische Betrachtung der mehrfach revidierten Fahrleistungsstatistik. In: Internationales Verkehrswesen. Fachzeitschrift für Wissenschaft und Praxis, Jg. 59, Nr. 4, April 2007, S. 144-148
- Hybrid-Autos (2007): Fahrzeuge – Honda – Civic IMA 2006. Internet: www.hybrid-autos.info/Bilder/Auto_Civic_IMA_2006.jpg. Zugriff: 11.04.2007
- Hycar (2007): Fahrzeugkonzepte. NECAR-Historie: Die Fahrzeugkonzepte NECAR 1 bis 3. Internet: www.Hycar.de. Zugriff: 13.02.2007
- IFA (Industrieverband Fahrzeugbau) (2006): 100 Jahre Karosseriebau Meerane Internet: www.meerane.de/meerane/100_jahre_automobilbau/ifa/ifa_meerane_start.php. Zugriff: 21.12.2006
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2004): CO2-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme. Heft R 523, Heidelberg
- IHK-München (2007): Titelthema: Energie – Sparen mit ganzer Kraft. In: Wirtschaft – Das IHK-Magazin 1/2007. Internet: www.ihk-muenchen.de/internet/mike/

WirUeberUns/ihk_magazin/Magazin_12007/Titelthema/EnergieSparenmitganzerKraft.html. Zugriff: 05.04.2007

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): Climate Change 2001: Synthesis Report. Internet: <http://www.ipcc.ch> Zugriff: 05.08.2006

ISI (Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung) (2002): Zukünftige Optionen für die rationelle Energienutzung. Bericht zum Forum Hemmnisabbau, 25. und 26. Februar 2002, Karlsruhe. Internet: www.isi.fhg.de/publ/downloads/isi02b22/hemmnisforum-2002.pdf. Zugriff: 22.05.2007

IWR (Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien) (2006): Biodiesel. Internet: www.iwr.de/biodiesel. Zugriff: 15.12.2006

Jürgens, Ulrich; Meißner, Heinz-Rudolf (2005): Arbeiten am Auto der Zukunft. Produktinnovationen und Perspektiven der Beschäftigung. Berlin: edition sigma

KBA (Kraftfahrtbundesamt) (2007): Statistiken. Fahrzeuge. Bestand. Emissionen, Kraftstoffe am 1. Januar 2007. Internet: www.kba.de. Zugriff: 15.05.2007

KBA (Kraftfahrtbundesamt) (2005): Verzeichnis der Kraftstoffverbrauchs- und Emissions-Typprüfwerte. 16. Ausgabe, Fassung: Dezember 2005. Daten-CD

KBA (Kraftfahrtbundesamt) (2006): Jahresbericht 2005. Statistiken. Internet: www.kba.de/Stabsstelle/Presseservice/Jahrespressebericht/2005/Jahresbericht2005_Kfz_Statistik.pdf. Zugriff: 28.11.2006

Keber, Martina (1997): Waldsterben oder "Neuartige Waldschäden". Internet: www.uni-koblenz.de/~odsbcg/baeume97/bsterb.htm. Zugriff: 28.11.2006

kfztech (2007): Plattform für Kfz-Technik von Johannes Wiesinger. Partikel/Feinstaub. Internet: www.kfztech.de/kfztechnik/motor/abgas/partikel.htm. Zugriff: 10.04.2007

Kirchhoff, Bruce A.; Walsh, Steven T. (2000): Entrepreneurship's Role in Commercialization of Disruptive Technologies, In: Brauchlin, Emil A.; Pichler, Johann H. (Hg.) (2000): Unternehmer und Unternehmensperspektiven für Klein- und Mittelunternehmen: Festschrift für Hans Jobst Pleitner, Berlin: Duncker&Humblot, S. 323-331

Kloeden (1911): Das Höllengebräu im Rheintal, Haus der Abgeordneten 1912. In: Brügge-meier, Franz-Josef; Toyka-Seid, Michael (Hg.): Industrie-Natur – Lesebuch zur Geschichte der Umwelt im 19. Jahrhundert, Frankfurt/New York: Campus, S. 103-104

Knie, Andreas (1991): Diesel – Karriere einer Technik. Genese und Formierungsprozesse im Motorenbau. Berlin: edition sigma

Knie, Andreas (1994): Wankel-Mut in der Autoindustrie. Anfang und Ende einer Antriebs-alternative. Berlin: edition sigma

Knie, Andreas (2003): Die Auto-Bahn: Intermodale Verkehrsdienstleistungen der Deutschen Bahn. In: Canzler, Weert; Schmidt, Gert (Hg.) (2003): Das zweite Jahrhundert des Automobils. Technische Innovationen, ökonomische Dynamik und kulturelle Aspekte. Berlin: edition sigma, S. 141-155

Knie, Andreas (Hg.) (2006): Zukunft 2020. Perspektiven für Chinas Motorisierung. (unveröffentlichte Studie), Berlin: WZB

Kölnerbucht (2006): Fahren mit Erdgas: Umweltschonend und wirtschaftlich. Internet: www.koelnerbucht.de/auv-fahrenmiterdgas.php. Zugriff: 05.03.2007

Konrad, Wilfried; Scheer, Dirk (2003): Systeminnovationen: Begriff, Fallbeispiele, Nachhaltigkeitspotentiale. Internet: www.ioew.de/dienstleistung/publikationen/Vortrag_Wilfried_Konrad_und_Dirk_Scheer.pdf. Zugriff: 27.06.2006

Krien, Philipp (2007): Systematisierung und Bewertung alternativer Kraftstoffe und Antriebe für Personenkraftwagen. Diplomarbeit an der Hochschule Ulm. Fachbereich Produktionstechnik und Organisation.

- Kroy, Walter (1995): Technologiemanagement für grundlegende Innovationen, In: Zahn, Erich (Hg.) (1995): Handbuch Technologiemanagement, Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 57-80
- Kurzweil, Peter (2006): Alternative Kraftstoffe und Hybridfahrzeuge – Innovation im Fahrzeugbereich mit neuen Antriebskonzepten. Internet: www.fh-amberg-weiden.de/home/kurzweil/PK_Hybridantriebe2006.pdf. Zugriff: 04.01.2007
- LBST (Ludwig Bölkow Systemtechnik) (2004): New Jersey übernimmt Kaliforniens Emissionsgesetzgebung für den Verkehr. Internet: www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?akt=359. Zugriff: 28.11.2006
- Leifer, Richard (2005): Radical Innovation and BSAC: Increasing the Chances of Tech Transfer. BSAC Spring 2005 IAB Meeting. Internet: [www-bsac.eecs.berkeley.edu/publications/iab_2005_3.ph](http://www.bsac.eecs.berkeley.edu/publications/iab_2005_3.ph), Zugriff: 21.08.2006
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2005): Ökonomie von Rapsölkraftstoffen. Internet: www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/biokraftstoffe/pdf/100traktoren/VRapsoel_01.pdf. Zugriff: 15.12.2006
- Liebermann, Sylvia (2005): Ölkonzern mahnt zum Energiesparen. Spiegel Online, 13.09.2005
- Luhmann, Niklas (1991): Soziologie des Risikos, Berlin/New York: de Gruyter
- Luhmann, Niklas (2000): Organisation und Entscheidung, Wiesbaden: Opladen
- Mansfield, Edwin (1961): Technical Change and the Rate of Imitation, In: Econometria 1961, Vol. 29, S. 741-766
- Marz, Lutz (1997a): Die Leonidow-Kugel. Zur technischen Paßfähigkeit moderner Architektonen. Poesie der Vergangenheit. Ein Essay zum Anlauf der "Masterplan"-Debatte. Discussion Paper FS II 97-102, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung
- Marz, Lutz (1997b): Zum Beispiel die Arbeitsschauuhr ... – Zu einem techniksoziologischen Engpaß und einem Ansatz seiner Überwindung. In: Dierkes, Meinolf (Hg.) (1997): Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm. Berlin: edition sigma, S. 195-223
- McKinsey (2006): Drive. The Future of Automotive Power. Internet: https://autoassembly.mckinsey.com/login.asp?cookies=True&script_name=/html/resources/publication/b_DRIV_E.asp&reason=denied_empty&Resolution=1024x768. Zugriff: 25.07.2006
- MI (Methanol Institute) (2005): Methanol Transportation Fuels: A Look Back and a Look Forward. Internet: www.methanol.org/pdf/MIPaperforISAF.pdf. Zugriff: 04.01.2007
- Müller, Detlef (2006): Hintergrundpapier zur Kennzeichnungsverordnung und zum Konzept der Nachrüstung mit Dieselpartikelfiltern. Internetpräsenz MdB Detlef-Müller. Internet: www.spd-mueller.de/usercontent/File/HintergrundpapierKennzeichenPartikel.pdf?PHPSESSID=937a13774c66282cbc0681e5bec3e225. Zugriff: 09.02.2007
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e.V.) (1999): Mineralöl-Logistik. Internet: www.mwv.de/Broschueren.html, Zugriff: 14.08.2006
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e.V.) (2000): Mineralölversorgung mit Pipelines. Internet: www.mwv.de/Broschueren.html, Zugriff: 14.08.2006
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e.V.) (2006a): Jahresbericht Mineralöl-Zahlen 2005. Internet: www.mwv.de/Jahresbericht.html, Zugriff: 14.08.2006
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e.V.) (2006b): Mineralöl-Barometer. Internet: www.mwv.de/cms/upload/pdf/barometer/Baro.pdf. Zugriff: 03.01.2007
- NaBu (2006): Freie Fahrt nur mit Feinstaub-Plakette. Beitrag, 24.02.2006. Internet: www.nabu.de/m07/m07_04/04676.html. Zugriff: 17.01.2007

- Nill, Jan; Konrad, Wilfried (2001): Innovationen für Nachhaltigkeit: ein interdisziplinärer Beitrag zur konzeptionellen Klärung aus wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Perspektive, Berlin: IÖW
- NYSERDA (New York State Energy Research and Development Authority) (1996): Methanol and ethanol.
Internet: www.nyserda.org/programs/pdfs/VOL3SC22.PDF. Zugriff: 29.01.2007
- Pehnt, Martin (2001): Ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen. Teilbericht und Materialband im Rahmen des HGF-Projektes "Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland". Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung (STB). STB-Bericht Nr. 24, Stuttgart
- PGM (Projektgruppe Mobilität) (2004): Die Mobilitätsmaschine. Versuche zur Umdeutung des Autos. Berlin: edition sigma
- Pöl-Tec (2006): Diesel-Rapsöl-Biodiesel-Vergleich.
Internet: www.poel-tec.ipmac.de/kraftstoff/vergleich.php. Zugriff: 15.12.2006
- Pöl-Tec (2007): Pflanzenöltankstellen Verzeichnisse.
Internet: http://poel-tec.ipmac.de/bezug/poel_tankstelle.php. Zugriff: 10.04.2007
- Rabe, Matthias (2004): BtL-Kraftstoff aus Sicht von Volkswagen. Internet: http://mobility-and-sustainability.com/_download/sunfuel_vortrag_rabe.pdf. Zugriff: 06.03.2007
- Rammler, Stephan (2001): Mobilität in der Moderne: Geschichte und Theorie der Verkehrssoziologie, Berlin: edition sigma
- Rauh, Wolfgang (2001): Klimakiller Verkehr. In: energiewende, Nr. 4/2001, S. 4-5
- Roberts, Edward B. (1987): Introduction: Managing Technological Innovation – A Search for Generalizations, In: Roberts, Edward B. (Hg.): Generating Technological Innovation, New York/Oxford, S. 3-21
- Rödl, Ernst (2006): Nikolaus August Otto legt den Grundstein für die Motorentechnik.
Internet: www.deutsches-museum.de/ausstell/meister/otto.htm. Zugriff: 08.09.2006
- Roventa, Peter; Weber, Johannes (2006): Automobilzulieferer-Mittelstand – quo vadis?
Internet: www.corfina.de/downloads/Automobilzulieferer-Mittelstand-quivadis.pdf. Zugriff: 21.07.2006
- Schindler, Jörg; Weindorf, Werner (2003): "Well-to-Wheel" – Ökologische und Ökonomische Bewertung von Fahrzeugkraftstoffen und -antrieben. Vortrag Nürnberg, 12. April 2003.
Internet: www.HyWeb.de/Wissen/pdf/Nuernberg_2003.pdf. Zugriff: 24.07.2006
- Schindler, Jörg; Weindorf, Werner (2005): Überblick über derzeit einsetzbare Kraftstoffe und neue Entwicklungen. Internet: www.muenchen.de/vip8/prod1/mde/_de/rubriken/Rathaus/65_raw/01_newsarchiv/01_archiv05/NKO. Zugriff: 14.07.2006
- Schubert, Erhard (2003): Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus der Sicht eines Industrieunternehmens. Vortrag. Düsseldorf, 30.09.2003. Internet: <http://www.wz.nrw.de/Brennstoffzellen/Schubert%20Pr%E4sentation.pdf#search=%22Veinte%20Nationen%20Bestand%20an%20Fahrzeugen%22>. Zugriff: 27.09.2006
- Schwind, Solveig (2006): Auskunft per email. Im Auftrag DVFG (Deutscher Verband Flüssiggas e.V.)
- SFK (Störfall Kommission beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2002): Anwendung der Wasserstoff-Technologie. Eine Bestandsaufnahme des AK Wasserstofftechnologie SFK-GS-37
Internet: www.sfk-taa.de/berichte_reports/berichte_sfk/sfk_gs_37.pdf. Zugriff: 05.01.2007
- SHISD (Shanghai Huaxia Institute of Social Development) (2005): The Status Quo and Development of Chinese Automobile Society, Modernization Research Center, (unveröffentlichte Untersuchung)

- Skrobek, Till (2006): Angriff von der Westküste. Zeit online am 22.9.2006
www.zeit.de/online/2006/39/kalifornien. Zugriff: 28.11.2006
- Spiegel-Online (2006): Problemstoff Kohlendioxid – Auf die Klimabremse treten. Internet:
www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,druck-451440,00.html. Zugriff: 26.01.2007
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2005): Potenziale und Instrumente zur CO₂-Verminderung von Pkw. Auszüge aus dem Sondergutachten Umwelt und Straßenverkehr. Internet: www.umweltrat.de/04presse/download04/hintgru/CO2Reduzierung_08_2005pdf. Zugriff: 15.07.2006
- Stan, Cornel (2005): Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. Berlin u. a.: Fachbuch Springer-Verlag
- T&E (European Federation for Transport and Environment) (2006): How Clean is Your Car Brand? The car industry's commitment to the EU to reduce CO₂ emissions: a brand-by-brand progress report. October 2006, T&E 06/3. Internet:
www.transportenvironment.org/docs/Publications/2006/2006-10_how_clean_is_your_car_brand.pdf. Zugriff: 31.12.2006
- Tillmetz, Werner; Benz, Uwe (2006): Methanol Fuel Cell Power Train. Vortrag. European Biofuel Congress, 17. Oktober 2006, Essen
- Tingyan, Xiao (1990): A Combined Growth Model for Trend Forecasting, In: Technological Forecasting and Social Change 1990, Vol. 38, S. 175-186
- Trinh, Tamara (2005): China 2010+. Welche Faktoren bestimmen die Zukunft Chinas? Siemens Workshop "China". Deutsche Bank Research, Eibsee. Internet:
http://www.dbresearch.com/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD00000000000191694.pdf. Zugriff: 08.08.2006
- Trömel, Martin; Loose, Susanne (1995): Das Wachstum technischer Systeme. In: Naturwissenschaften 82 (1995), S. 160-169
- UBA (Umweltbundesamt) (2001): Klimaschutz 2001. Tatsachen, Risiken, Handlungsmöglichkeiten.
 Internet: www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/klimaschutz.htm. Zugriff: 05.08.2006
- UBA (Umweltbundesamt) (2003): Dieselfahrzeuge. Internet: www.umweltbundesamt.de/verkehr/techemissmm/dieselfahrzeuge.htm. Zugriff: 12.02.2007
- UBA (Umweltbundesamt) (2006a): Schadstoffemissionen Pkw. Internet: www.umweltbundesamt.de/verkehr/rechtrahm/schadstoffemiss/Pkw/emiPkw.htm. Zugriff: 28.11.2006
- UBA (Umweltbundesamt) (2006b): Hybrid-elektrische Antriebe. Internet: www.umweltbundesamt.de/verkehr/alternantrieb/hybridfahzeu/hybrid.htm. Zugriff: 28.11.2006
- UBA (Umweltbundesamt) (2006c): CO₂-Emissionminderung im Verkehr. Internet:
www.umweltbundesamt.de/verkehr/emissionen/schadstoffe/klima/co2/klimaverk.htm.
 Zugriff: 06.02.2006
- UBA (Umweltbundesamt) (2007): Luftschadstoffe – Feinstaub (PM₁₀): Internet: www.env-it.de/luftdaten/start.fwdhttp://www.env-it.de/luftdaten/pollutant.fwd?comp=PM10. Zugriff: 10.02.2007
- Umbach, Clemens (2006): Erdgasfahrzeuge. SWU-Unternehmensgruppe.
- Umweltdatenbank (2007): Cetanzahl.
 Internet: www.umweltdatenbank.de/lexikon/cetanzahl.htm. Zugriff: 13.03.2007
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2000): Control of Air Pollution From New Motor Vehicles: Tier 2 Motor Vehicle Emissions Standards and Gasoline Sulfur Control Requirements. Internet: <http://www.epa.gov/EPA-AIR/2000/February/Day-10/a19a.htm>. Zugriff: 05.02.2007
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2007): Green Vehicle Guide. Internet:
www.epa.gov/greenvehicles/index.htm. Internet: 11.06.2007

- VCD (2006a): Die VCD-Umweltliste 2007/2007. Internet: www.vcd.org/auli2006.html. Zugriff: 09.05.2007
- VCD (2006b): EU verteilt vorzeitige Weihnachtsgeschenke an Autoindustrie. Pressemitteilungen 2006, Berlin, 12.12.06. Internet: www.vcd.org/301.html?&tx_cwtpresscenter_pi1%5BshowUid%5D=386&cHash=51fc1a5e6e. Zugriff: 20.12.2006
- VCD (2007a): Umweltzonen - VCD informiert über Fahrverbote und Plaketten. Pressemitteilung Service 01/07, Internet: www.vcd.org/fileadmin/user_upload/redakteure/vcd_aktiv/vcd_tipps/0701_VCDTipp01_Plaketten.pdf. Zugriff: 12.01.2007
- VCD (2007b): Plaketten, Umweltzonen und Fahrverbote. VCD Information 01/2007. Internet: www.vcd.org/fileadmin/user_upload/redakteure/themen/auto_und_motorrad/umweltzone/Umweltzone.pdf. Zugriff: 05.02.2007
- VDA (Verband der Automobilindustrie e.V.) (2006): Auto Jahresbericht 2006. ISSN 0171-4317. Internet: www.vda.de/de/service/jahresbericht/files/VDA_2006.pdf. Zugriff: 04.03.2007
- VDA (Verband der Automobilindustrie e.V.) (2007): CO₂-Minduerung im deutschen Verkehrssektor – eine Zwischenbilanz. Broschüre. Internet: www.vda.de/de/co2_klimaschutz/broschuere/files/CO2-Minderungen_im_dt_Verkehrssektor.pdf. Zugriff: 05.03.2007
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2006): Kraftstoffe: An den Tankstellen mehren sich die Kraftstoffarten – Ende offen. Pack den Tiger in den Tank – aber welchen? Artikel, VDI-Nachrichten 8.9.2006. Internet: www.vdi-nachrichten.com/vdi_nachrichten/aktuelle_ausgabe/akt_ausg_detail.asp?cat=2&id=29549&source=rss&doPrint=1. Zugriff: 01.04.2007
- VW (2005): SunFuel – der Weg zur nachhaltigen Mobilität. Internet: www.volkswagen-umwelt.de/_download/141205_RZ05D_sunf_ccp_30.pdf. Zugriff: 15.12.2006
- VW (2006a): Biokraftstoffe aus Sicht der Automobilindustrie. Aus Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis, Nr. 1, 15. Jahrgang, April 2006, S. 42-50. Schwerpunkt: Biogene Kraftstoffe – Kraftstoffe der Zukunft? Internet: www.itas.fzk.de/tatup/061/seyf06a.htm. Zugriff: 15.12.2006
- Weider, Marc (2006): Technology Forcing – Verkehrspolitik und Umweltinnovation. In: Schöller, Oliver; Canzler, Weert; Knie, Andreas (Hg.): Handbuch Verkehrspolitik, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 663-684
- Weider, Marc; Marz, Lutz (2005): Quantensprung oder Sackgasse? Zum Stand und den Entwicklungsperspektiven der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in der Automobilindustrie. In: Rammler, Stephan; Weider, Marc (Hg.): Wasserstoffauto – Zwischen Markt und Mythos, Münster: LIT Verlag, S. 9-33.
- Weider, Marc; Metzner, André; Rammler, Stephan (2004): Das Brennstoffzellen-Rennen. Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie, Discussion paper, SP III 2004-101, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung
- Welt-Online (2007): Vom Ticken der Uhr bis zum Presslufthammer – Geräusche in Dezibel. Artikel, 14. August 2004. Internet: www.welt.de/print-welt/article334313/Vom_Ticken_der_Uhr_bis_zum_Presslufthammer_-_Geraeusche_in_Dezipel.html. Zugriff: 07.04.2007
- Wikipedia (2007a): Suchbegriff: Jetta. Internet: <http://de.wikipedia.org/wiki/Jetta>. Zugriff: 11.04.2007
- Wikipedia (2007b): Suchbegriff: Trabant. Internet: [http://de.wikipedia.org/wiki/Trabant_\(Pkw\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Trabant_(Pkw)). Zugriff: 11.04.2007
- Wolbach, C. Dean (2006): History of Air Pollution. Internet: www.co.mendocino.ca.us/aqmd/AQhistory.htm. Zugriff: 04.12.2006

- Wood, John H.; Long, Gary R.; Morehouse, David F. (2004): Long-Term World Oil Supply Scenarios. The Future Is Neither as Bleak as Rosy as Some Assert. Internet: www.eia.doe.gov/pub/oil_gas/petroleum/feature_articles/2004/worldoil_supply/oilsupply04.html. Zugriff: 09.08.2006
- Wurster, Reinhold (1997): Brennstoffzellenantriebe für Strassen- und Schienenfahrzeuge mit niedrigsten oder Null-Emissionen. Vortrag,ACHEMA 1997. Internet: www.hyweb.de/Wissen/brennstoff_Schiene.htm. Zugriff: 04.12.2006
- Zittel, Werner, Schindler, Jörg (2004): The Countdown for the Peak of Oil Production has Begun – but what are the Views of the Most Important International Energy Agencies? Internet: www.odac-info.org/links/documents/LBST_Countdown_2004-10-12.pdf . Zugriff: 25.07.2006
- Zittel, Werner; Schindler, Jörg (2003): Depletion of Oil. Internet: http://www.lbst.de/publications/articles_before2004/34b_Salzburg-update_2003.pdf. Zugriff: 23.07.2006

Veröffentlichungsreihe der Abteilung „Innovation und Organisation“
des Forschungsschwerpunktes Organisationen und Wissen am
Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

elektronisch verfügbar unter:
http://www.wzb.eu/publikation/discussion_papers/liste_discussion_papers.de.htm

1999

- FS II 99-101 Emily Udler, Israeli Business in Transition, 45 S.
- FS II 99-102 Mark B. Brown, Policy, design, expertise, and citizenship: Revising the California electric vehicle program, 49 S.
- FS II 99-103 Stefan Bratzel, Umweltorientierter Verkehrspolitikwandel in Städten. Eine vergleichende Analyse der Innovationsbedingungen von „relativen Erfolgsfällen“, 74 S.

2000

- FS II 00-101 Sabine Helmers, Ute Hoffmann & Jeanette Hofmann. Internet ... The Final Frontier: An Ethnographic Account. Exploring the cultural space of the Net from the inside, 124 S.
- FS II 00-102 Weert Canzler und Sassa Franke, Autofahren zwischen Alltagsnutzung und Routinebruch. Bericht 1 der choice-Forschung, 26 S.
- FS II 00-103 Mikael Hård und Andreas Knie, Getting Out of the Vicious Traffic Circle: Attempts at Restructuring the Cultural Ambience of the Automobile Throughout the 20th Century, 20 S.
- FS II 00-104 Ariane Berthoin Antal, Ilse Stroo and Mieke Willems, Drawing on the Knowledge of Returned Expatriates for Organizational Learning. Case Studies in German Multinational Companies. 47 S.
- FS II 00-105 Ariane Berthoin Antal und Meinolf Dierkes, Organizational Learning: Where Do We Stand? Where Do We Want to Go?, 33 S.

2001

- FS II 01-101 Katrin Böhling, Zur Bedeutung von „boundary spanning units“ für Organisationslernen in internationalen Organisationen, 34 S.

2002

- FS II 02-101 Ute Hoffmann und Jeanette Hofmann, Monkeys, Typewriters and Networks. The Internet in the Light of the Theory of Accidental Excellence, 24 S.
- FS II 02-102 Ute Hoffmann, Themenparks re-made in Japan. Ein Reisebericht, 26 S.
- FS II 02-103 Weert Canzler & Sassa Franke, Changing Course in Public Transport: The Car as a Component of Competitive Services. Choice-Research, Report No. 2, 58 S.

FS II 02-104	Weert Canzler & Sassa Franke, Mit cash car zum intermodalen Verkehrsangebot. Bericht 3 der choice-Forschung, 67 S.
FS II 02-105	Ariane Berthoin Antal, Meinolf Dierkes, Keith MacMillan & Lutz Marz, Corporate Social Reporting Revisited, 32 S.
FS II 02-106	Martin Gegner, Die Wege des urbanen Verkehrs zur Daseinsvorsorge, 63 S.
FS II 02-107	Meinolf Dierkes, Lutz Marz & Ariane Berthoin Antal, Sozialbilanzen. Konzeptioneller Kern und diskursive Karriere einer zivilgesellschaftlichen Innovation, 18 S.
FS II 02-108	Christiana Weber & Barbara Weber, Learning in and of Corporate Venture Capital Organizations in Germany. Industry structure, companies' strategies, organizational learning capabilities, 19 S.
FS II 02-109	Jeanette Hofmann unter Mitarbeit von Jessica Schattschneider, Verfahren der Willensbildung und Selbstverwaltung im Internet – Das Beispiel ICANN und die At-Large-Membership, 155 S.
FS II 02-110	Kathrin Böhling, Learning from Environmental Actors about Environmental Developments. The Case of International Organizations, 40 S.
FS II 02-111	Astrid Karl, Öffentlicher Verkehr im künftigen Wettbewerb. Wie ein inkonsequenter Ordnungsrahmen und überholte Finanzierungsstrukturen attraktive öffentliche Angebote verhindern, 60 S.
FS II 02-112	Thomas Sauter-Servaes & Stephan Rammner, Delaytainment an Flughäfen. Die Notwendigkeit eines Verspätungsservices und erste Gestaltungsideen, 83 S.
FS II 02-113	Ariane Berthoin Antal & Meinolf Dierkes, Organisationslernen und Wissensmanagement: Überlegungen zur Entwicklung und zum Stand des Forschungsfeldes, 39 S.
FS II 02-114	Ariane Berthoin Antal & Meinolf Dierkes, On the Importance of Being Earnest about Business: Overcoming liberal arts students' misconceptions about leadership in corporate change processes, 31 S.
FS II 02-115	Daniela Zenone, Das Automobil im italienischen Futurismus und Faschismus. Seine ästhetische und politische Bedeutung, 72 S.

2003

SP III 03-101	Ariane Berthoin Antal & Victor Friedman, Negotiating Reality as an Approach to Intercultural Competence, 35 S.
SP III 03-102	Ariane Berthoin Antal, Camilla Krebsbach-Gnath & Meinolf Dierkes, Hoechst Challenges Received Wisdom on Organizational Learning, 36 S.
SP III 03-103	Ariane Berthoin Antal & Jing Wang. Organizational Learning in China: The Role of Returners, 29 S.
SP III 03-104	Jeanette Hofmann, Die Regulierung des Domainnamensystems – Entscheidungsprozess und gesellschaftliche Auswirkungen der Einrichtung neuer Top Level Domains im Internet, 122 S.
SP III 03-105	Oliver Schöller & Stephan Rammner, „Mobilität im Wettbewerb“ Mög-

	lichkeiten und Grenzen integrierter Verkehrssysteme im Kontext einer wettbewerblichen Entwicklung des deutschen und europäischen Verkehrsmarktes – Begründung eines Forschungsvorhabens, 35 S.
SP III 03-106	Falk Berndt & Hermann Blümel, ÖPNV quo vadis? Aufforderung zu verkehrspolitischen Weichenstellungen im ÖPNV, 73 S.
SP III 03-107	Tobias Wölfe und Oliver Schöller, Die kommunale „Hilfe zur Arbeit“ im Kontext kapitalistischer Arbeitsdisziplinierung, 26 S.
SP III 03-108	Markus Petersen, Multimodale Mobilisations und Privat-Pkw, Ein Vergleich auf Basis von Transaktions- und monetären Kosten. Bericht 4 der choice-Forschung, 41 S.
SP III 03-109	Ariane Berthoin Antal & Victor J. Friedman, Learning to Negotiate Reality: A Strategy for Teaching Intercultural Competencies, 33 S.
SP III 03-110	Ute Hoffmann (Hg.), Reflexionen der kulturellen Globalisierung. Interkulturelle Begegnungen und ihre Folgen. Dokumentation des Kolloquiums „Identität-Alterität-Interkulturalität. Kultur und Globalisierung“ am 26./27. Mai 2003 in Darmstadt, 183 S.
SP III 03-111	Christiana Weber, Zeit und Zeitkompensation in der Entstehung und Entwicklung von Organisationskultur, 41 S.
SP III 03-112	Gerhard Prätorius & Christian Wichert, Integrierte Verkehrspolitik als Realtypus – mehr als die Summe von Teillösungen?, 60 S.
SP III 03-113	Christiana Weber & Barbara Weber, Corporate Venture Capital Organizations in Germany. A Comparison, 46 S.
SP III 03-114	Marc Weider, André Metzner & Stephan Rammner, Die Brennstoffzelle zwischen Umwelt-, Energie- und Wirtschaftspolitik. Darstellung der öffentlichen Förderprogramme für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Deutschland, der Europäischen Union, den USA und Japan, 77 S.
SP III 03-115	Martin Gegner, Crash, Boom, Bang – Reload. Metamorphosen eines Softwareprojekts in Zeiten des New Economy-Hypes, 32 S.
SP III 03-116	Ying Zhu, Leapfrogging into Hydrogen Technology: China's 1990-2000 Energy Balance, 43 S.
SP III 03-117	Maria Oppen, Detlef Sack & Alexander Wegener, Innovationsinseln in korporatistischen Arrangements. Public Private Partnerships im Feld sozialer Dienstleistungen, 61 S.

2004

SP III 04-101	Marc Weider, André Metzner & Stephan Rammner, Das Brennstoffzellen-Rennen. Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie, 137 S.
---------------	---

SP III 04-102	Ariane Berthoin Antal, The Centrality of ‚Between‘ in Intellectual Entrepreneurship, 27 S.
SP III 04-103	Martin Gegner, Die Auto-Referenz des öffentlichen Nahverkehrs – Selbst-, Konkurrenz- und Kundenbild im Marketing des Verbands Deutscher Verkehrsbetriebe, 102 S.
SP III 04-104	Holger Straßheim, Power in intercommunal knowledge networks. On the endogenous dynamics of network governance and knowledge creation, 37 S.
SP III 04-105	Marc Weider, China – Automobilmarkt der Zukunft? – Wie nachhaltig und zukunftsorientiert sind die Strategien der internationalen Automobilindustrie in China?, 73 S.
SP III 04-106	Ariane Berthoin Antal & Victor J. Friedman, Overcoming dangerous learning: The role of critical reflection in cross-cultural interactions, 26 S.
SP III 04-107	Felix Beutler, Intermodalität, Multimodalität und Urbanibility – Vision für einen nachhaltigen Stadtverkehr, 36 S.
SP III 04-108	Gerhard Prätorius & Christian Wichert, Die Ergänzung der Haushalts- durch Nutzerfinanzierung von Verkehrsinfrastrukturen, 36 S.
SP III 04-109	Hermann Blümel, Mobilitätsdienstleister ohne Kunden. Kundenorientierung im öffentlichen Nahverkehr, 114 S.
SP III 04-110	Maria Brie & Hagen Pietzcker, NGOs in China – Die Entwicklung des Dritten Sektors, 53 S.
SP III 04-111	Anke Borchering, Strategies, Programs, and Projects Pertaining to Policy on Transport. Research in Selected European States, the United States, and Japan (Short title: „SmartBench“) Final Report on Sweden, 50 S.
SP III 04-112	Ariane Berthoin Antal & André Sobczak, Beyond CSR: Organizational Learning for Global Responsibility, 41 S.

2005

SP III 05-101	Martin Lengwiler, Probleme anwendungsorientierter Forschung in den Sozialwissenschaften am Beispiel der Ausgründung „choice“, 59 S.
SP III 05-102	Maria Brie, Prozesse politischer Entscheidungsfindung in China. Die „Vierte Führungsgeneration“, 58 S.
SP III 05-103	Miriam Barnat, Lernen und Macht in einer Non-Profit Organisation, 50 S.
SP III 05-104	Roman Pernack, Öffentlicher Raum und Verkehr. Eine sozialtheoretische Annäherung, 46 S.
SP III 05-105	Ying Zhu, Energy and Motorization. Scenarios for China’s 2005-2020 Energy Balance, 64 S.

- SP III 05-106 Weert Canzler & Andreas Knie, Demografische und wirtschaftsstrukturelle Auswirkungen auf die künftige Mobilität: Neue Argumente für eine neue Wettbewerbsordnung im Öffentlichen Verkehr, 35 S.
- SP III 05-107 Christiana Weber, Corporate Venture Capital als Beitrag zum Wissensmanagement – eine vergleichende Langzeitstudie in Deutschland, 55 S.

2006

- SP III 06-101 Christian Maertins, Die Intermodalen Dienste der Bahn: Mehr Mobilität und weniger Verkehr? Wirkungen und Potenziale neuer Verkehrsdienstleistungen, 79 S.
- SP III 06-102 Kathrin Böhling, Tanja Busch, Ariane Berthoin Antal & Jeannette Hofmann, Lernprozesse im Kontext von UN-Weltgipfeln. Die Vergesellschaftung internationalen Regierens, 34 S.
- SP III 06-103 Martini, Stefan, Gibt es ein subjektives Recht auf öffentlichen Verkehr? Grundrechte statt Daseinsvorsorge, 61 S.

2007

- SP III 07-101 Ariane Berthoin Antal, Maria Oppen & André Sobczak, (Re)discovering the social responsibility of business in Germany, 33 S.
- SP III 07-102 Thomas Aigle, Lutz Marz, Automobilität und Innovation. Versuch einer interdisziplinären Systematisierung, 112 S.
- SP III 07-103 Stefan Kirchner, Maria Oppen, Das Ende der Reorganisationsdynamik? High Performance Work Practices als Muster der Reorganisation in Deutschland, 50 S.
- SP III 07-104 Oliver Schöller, Urbanität und Mobilität. Residenzwahl in der Zweiten Moderne, 24 S.

Bei Ihren Bestellungen von WZB-Papers schicken Sie bitte unbedingt einen an Sie adressierten **Aufkleber** mit, sowie **je Paper** eine **Briefmarke im Wert von Euro 0,55** oder einen **"Coupon Réponse International"** (für Besteller aus dem Ausland).

Please send a **self-addressed label** and **postage stamps in the amount of 0,55 Euro** or a **"Coupon-Réponse International"** (if you are ordering from outside Germany) for **each** WZB-Paper requested.

Bestellschein

Order Form

Wissenschaftszentrum Berlin
für Sozialforschung gGmbH
INFORMATION UND KOMMUNIKATION
Reichpietschufer 50
D-10785 Berlin

Absender • Return Address:

Hiermit bestelle ich folgende(s) Discussion Paper(s) • Please send me the following Discussion Paper(s)
Autor(en) / Kurztitel • Author(s) / Title(s) in brief

Bestellnummer • Order no.

--	--

